

Российская академия наук
Министерство образования и науки РФ
Сибирское отделение РАН
Институт вычислительных технологий СО РАН
Кемеровский государственный университет
Институт вычислительного моделирования СО РАН
Институт динамики систем и теории управления СО РАН
Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН
Новосибирский государственный технический университет
Администрация Кемеровской области
Администрация г. Кемерово
Главное управление по делам ГО и ЧС Администрации Кемеровской области
ОАО «Кузбасский технопарк»

Проблемы мониторинга окружающей среды (ЕМ-2011)



24-28 октября 2011 года

**Сборник трудов XI Всероссийской конференции
с участием иностранных ученых**

Кемерово 2011

П 78 Проблемы мониторинга окружающей среды: Сборник трудов XI Всероссийской конференции с участием иностранных ученых (24-28 октября 2011 г.). Кемерово: КемГУ. 2011. 388 с.: 150 экз.
ISBN 978-5-8353-1169-9

Сборник трудов подготовлен по результатам работы конференции «Проблемы мониторинга окружающей среды» (ЕМ-2011), которая проходила с 24 по 28 октября 2011 г. в г. Кемерово. В сборнике представлены результаты исследований по следующим направлениям: математическое моделирование природных и антропогенных катастроф; моделирование экологических и техногенных процессов и систем; интегрированные геоинформационные технологии и системы для задач мониторинга.

Сборник будет полезен для научных и инженерных работников, аспирантов и студентов вузов, занимающихся проблемами мониторинга окружающей среды.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Шокин Ю.И. академик, Институт вычислительных технологий СО РАН

Заместители председателя:

Ковалев В.А. д.т.н., заместитель Губернатора Кемеровской области
Бычков И.В. чл.-корр. РАН, Институт динамики систем и теории управления СО РАН
Москвичев В.В. профессор, СКТБ «Наука» Красноярского научного центра СО РАН

Члены программного комитета:

Афанасьев К.Е. профессор, Кемеровский государственный университет
Винокуров Ю.И. профессор, Институт водных и экологических проблем СО РАН
Голушко С.К. д.ф.-м.н., Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН
Гришин А.М. профессор, Томский государственный университет
Данаев Н.Т. профессор, академик НИА РК, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби
Добрецов Н.Н. к.г.-м.н., Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН
Захаров Ю.Н. профессор, Кемеровский государственный университет
Конторович А.Э. академик, председатель Президиума Кемеровского научного центра СО РАН
Пестунов И.А. к.ф.-м.н., Институт вычислительных технологий СО РАН
Потапов В.П. профессор, кемеровский филиал Института вычислительных технологий СО РАН
Пустовой Н.В. профессор, Новосибирский государственный технический университет
Рычков А.Д. профессор, Институт вычислительных технологий СО РАН
Смагин С.И. чл.-корр. РАН, Вычислительный центр ДВО РАН
Стемпковский А.Л. академик, Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН
Счастливец Е.Л. д.т.н., кемеровский филиал Института вычислительных технологий СО РАН
Тулохонов А.К. чл.-корр. РАН, Байкальский институт природопользования СО РАН
Федотов А.М. чл.-корр. РАН, Институт вычислительных технологий СО РАН
Чубаров Л.Б. профессор, Институт вычислительных технологий СО РАН
Шайдунов В.В. чл.-корр. РАН, Институт вычислительного моделирования СО РАН
Юлдашев З.Х. профессор, Ташкентский государственный университет

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ КАТАСТРОФ

О математическом моделировании возникновения и распространения природных пожаров <i>А.М. Гришин</i>	8
Математическая модель зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным солнечным излучением для мониторинга неустановленных причин возникновения лесных пожаров <i>Н.В. Барановский, Г.В. Кузнецов</i>	13
Об одной нестационарной модели движения примесей в закрытых водоемах <i>Л.В. Бондарева</i>	18
Об одном методе восстановления параметров выбросов в атмосферу от пылящего неорганизованного источника <i>А.А. Быков, М.Ю. Захаров</i>	22
Ангарский регион России: водохранилища ГЭС, окружающая среда и проблемы дистанционно-картографического зондирования <i>А.Я. Гиенко, Б.Н. Нефедов</i>	27
Исследование природно-техногенных систем методом компьютерного моделирования физико-химических процессов <i>Н.В. Головных, В.А. Бычинский, А.В. Мухетдинова, И.И. Шепелев, К.В. Чудненко</i>	33
Среднемасштабные экспериментальные исследования распространения полевого пожара и его воздействие на деревянные конструкции и слой торфа <i>А.М. Гришин, А.И. Фильков, Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, А.В. Козлов, В.Т. Кузнецов, С.М. Андреюк, А.И. Иванов, Н.Д. Столярчук</i>	38
Решение нестационарной задачи протекания в каналах при заданном перепаде давления <i>Е.Э. Гуммель, Ю.Н. Захаров</i>	44
Предварительная оценка точности определения координат землетрясений в системе сейсмологических наблюдений для службы предупреждения цунами (СПЦ) <i>О.К. Омельченко, В.К. Гусьяков, В.Н. Чебров</i>	48
Мониторинг угла наклона повторяемости в техногенной последовательности землетрясений <i>А.Ф. Еманов, А.Г. Филина, А.В. Фатеев, В.Г. Подкорытова, Л.А. Подлипская, Е.В. Шевкунова</i>	51
Модели и алгоритмы анализа состояния сложных литологических структур <i>Р.Ю. Замараев</i>	53
Моделирование катастрофических гляциальных паводков в горах Алтая и на юге Западно-Сибирской равнины <i>И.Д. Зольников, Н.В. Глушкова, С.А. Семенова</i>	58
Физическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров <i>А.М. Гришин, В.Т. Кузнецов, В.П. Зима, Д.П. Касымов</i>	63
Применение методов численного анализа для решения задач экологического мониторинга качества воды в водоемах <i>Е. А. Калинина, И.С. Вахитов</i>	68
Вихревое перемешивание и энергетика турбулентности в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое <i>А.Ф. Курбацкий, Л.И. Курбацкая</i>	72
Воздействия природно-климатических факторов на состояние растительности Уюкского хребта <i>Х.Б. Куулар, Е.И. Пономарев, С.А. Чушикова</i>	77
Численное моделирование движения газа в пористых средах с очагами гетерогенного горения <i>Н.А. Луценко</i>	82
Влияние формы вертикальных подвижек дна на образование поверхностных волн <i>Л.В. Надкритичный</i>	87
Функциональное моделирование процесса поддержки принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования <i>Л.Ф. Ноженкова, К.В. Бадмаева, А.А. Мельник, Р.В. Морозов</i>	93

Математическое моделирование перехода низового лесного пожара в верховой в трехмерной постановке <i>В.А. Перминов</i>	98
Течение неоднородного газа в подземном газификаторе <i>М.С. Родина</i>	104
Численный анализ обратной задачи распространения загрязнений в водоемах <i>О.В. Соболева</i>	108
Численное решение задачи обнаружения источника загрязнения для нелинейной модели массопереноса <i>Д.А. Терешко</i>	113
Оценивание сейсмоакустических эффектов техногенных взрывов с помощью сейсмических вибраторов <i>М.С. Хайретдинов, С.А. Авроров, Г.Ф. Седухина, А.А. Якименко</i>	118
Волны-убийцы в океане: численное моделирование <i>Р.В. Шамин, А.И. Смирнова, А.В. Горленко, А.В. Юдин</i>	123
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ	
Влияние изменчивости метеорологических параметров и дисперсного состава атмосферных выбросов на модельные оценки осаждения промышленной пыли <i>А.А. Быков, Е.Л. Счастливцев, С.Г. Пушкин</i>	129
Разрывы в свойствах массивов данных как признаки границ в уникальных структурах <i>А.Б. Логов</i>	135
Логико-вероятностное моделирование динамики заболеваемости клещевым энцефалитом в зависимости от природных факторов <i>В.Б. Бериков, И.А. Пестунов, О.В. Морозова, В.Н. Бахвалова, Г.Л. Полякова, В.В. Панов</i>	138
Ландшафтный рисунок на снимках разного пространственного разрешения <i>И.Д. Махатков, И.А. Пестунов, С.А. Рылов</i>	144
Эволюция пограничного слоя и особенности загрязнения атмосферы в условиях города <i>М.А. Битехтина, С.В. Михайлюта, О.В. Тасейко, А.А. Леженин</i>	149
Обнаружение на естественном фоне объектов техносферы на основе поиска пространственных аномалий <i>С.М. Борзов, О.Ю. Дашевский, О.И. Потатуркин</i>	150
Оценка экологической безопасности атмосферного воздуха на основе решения уравнений Колмогорова <i>Т.В. Гавриленко, О.В. Адмаев</i>	151
Разработка математической модели оценки риска при анализе состояния и мониторинга окружающей среды <i>Н.П. Гончарова</i>	156
Мониторинг нарушений и развитие почвенного покрова в техногенных ландшафтах горно-таежного пояса Кузбасса (на примере г. Междуреченска) <i>В.Г. Двуреченский</i>	161
Методы выявления пространственного группирования землетрясений при сейсмо-геодинамических исследованиях в информационной системе GIS-EEDB <i>П.Г. Дядьков, Ан.Г. Марчук, А.В. Михеева</i>	166
Разработка методов сбора отходов производства и потребления <i>В.И. Егоров</i>	172
Прогнозирование температуры вспышки бинарных жидких смесей <i>З.Н. Есина, М.Р. Корчуганова, В.В. Мурашкин</i>	177
Информационно-моделирующие комплексы для изучения водных объектов Сибири (на примере Верхней Оби) <i>А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, О.В. Ловцкая, А.В. Кудышин</i>	183
Оптимизация Распределения материальных ресурсов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера в химической промышленности <i>Б.Р. Исмаилов, А.Ш. Шарафиев, Х.Б. Исмаилов</i>	187
Математические модели распространения инфекционных заболеваний <i>Л. Кадена</i>	192

Мониторинг распространения парниковых газов в Сибирском регионе на основе усвоения данных наблюдений <i>Е.Г. Климова, Н.В. Киранова</i>	193
Применение регрессионных моделей для описания многолетнего эпизоотического процесса (Каргинский участок Тувинского природного очага чумы) <i>Н.А. Кол, А.Ф. Чульдум, М.Г. Ростовцев</i>	198
Инженерно-геокриологический мониторинг БАМ: опыт, проблемы, задачи <i>В.Г. Кондратьев</i>	203
Распределение плотности температурного коэффициента интенсивности мюонов в атмосфере и высотный ход температуры <i>В.С. Кузьменко, В.Л. Янчуковский, Е.Н. Анцыз</i>	207
Изменение подстилающей поверхности в районе Юрубченского месторождения в результате антропогенной деятельности <i>С.В. Михайлюта, О.В. Тасейко, А.А. Леженин, Н.В. Трофимова</i>	211
Информационно-вычислительная система для анализа влияния загрязнения окружающей среды на биологические объекты <i>Ю.И. Молородов, В.С. Миньков</i>	217
Уточнение исходной сейсмичности на примере трассы железной дороги «Курагино – Кызыл» <i>С.А. Перетокин, К.В. Симонов</i>	221
Численный анализ данных аэрозольных выпадений радионуклидов при аварийных выбросах в атмосферу <i>В.Ф. Рапута</i>	228
Мониторинг горных ледников: задачи, новые методы, перспективы <i>С.Ю. Самойлова</i>	233
Методы и средства организации параллельных и распределенных вычислений на основе парадигмы модульного программирования <i>И.В. Бычков, Г.А. Опарин, А.П. Новопашин, И.А. Сидоров, С.А. Горский</i>	237
Мониторинг последствий изменения уровня режима озера Байкал дистанционными методами (на примере островной гряды Ярки) <i>А.К. Тулохонов, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев</i>	244
Водные ресурсы России и Беларуси <i>Н.Я. Шапарев</i>	249
Лесные ресурсы России и Беларуси в показателях устойчивого развития <i>Н.Я. Шапарев</i>	254
Разработка дополнительных биоинформационных критериев экологического мониторинга в крупных промышленных центрах <i>А.В. Шабалдин, Л.А. Глебова, Е.Л. Счастливцев, А.А. Быков</i>	260
Опыт использования математической модели распределения птиц в картографировании и мониторинге их ресурсов <i>В.А. Юдкин</i>	266
ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА	
Информационное обеспечение задач мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли <i>О.Э. Якубайлик, А.А. Гостева, М.Г. Ерунова, А.А. Кадочников, А.Г. Матвеев, А.С. Пятаев, А.В. Токарев</i>	273
Геоинформационный подход к адаптивному экологическому мониторингу в Алтае-Саянском экорегионе <i>Ю.П. Баденков, И.Н. Ротанова</i>	279
Проблема извлечения из текстовых документов географических названий, отражающих содержание <i>В.Б. Бараннин, О.Л. Жижимов, Д.М. Скачков</i>	285
Геопортал Иркутского научного центра СО РАН <i>И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов, Р.К. Федоров, А.С. Гаченко, А.О. Шигаров</i>	291

Система анализа многомерных статистических данных социально-экономического положения республики Монголия на основе технологии метаописаний <i>А.А. Ветров, Е.С. Ферреферов, А.Е. Хмельнов, Б. Цогоо</i>	298
Информационная система для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии <i>А.П. Григорюк, Л.П. Брагинская</i>	305
Интеграция разнородных данных на основе понятия электронного документа в системе распределенных информационных хранилищ <i>А.М. Гудов, В.В. Мешечкин</i>	310
Технологии компьютерного картографирования, ГИС-анализа и моделирования природно-антропогенных экосистем на примере Новосибирского Академгородка <i>Н.Н. Добрецов, И.Д. Зольников, Н.В. Глушкова, В.А. Лямина, К.С. Соколов, Н.И. Макунина, В.В. Смирнов, Д.В. Пчельников</i>	314
Геоинформационные веб-сервисы и приложения для интернет-системы мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края <i>А.А. Кадочников</i>	320
Система параллельной обработки спутниковых данных <i>В.А. Кихтенко</i>	326
Исследование воздействия транспортного потока на городские и загородные экосистемы <i>С.В. Ковтун, О.В. Адмаев</i>	328
Информационные слои распределенной ГИС для оценки запасов углерода в почвах бореальной зоны Западной Сибири <i>С.Я. Кудряшова, К.С. Байков, А.А. Титлянова, Л.Ю. Дитц, И.Д. Махатков, Н.П. Косых, С.В. Шибарева</i>	333
Использование картографического сервера с открытым кодом для создания ГИС «реестр водных объектов Обь-Иртышского бассейна» <i>О.В. Ловцкая, Н.А. Балдаков, К.Б. Кошелев</i>	336
Использование ГИС-технологий в области обращения с отходами <i>А.В. Михайлов</i>	341
Некоторые особенности работы с космическими снимками для оценки изменения территорий <i>С.А. Мустафин, А.А. Зейнуллина</i>	347
Экспертная ГИС поддержки принятия решений в паводкоопасных ситуациях для территорий Сибирского региона <i>Л.Ф. Ноженкова, В.В. Ничепорчук</i>	351
Спектрально-текстурная сегментация спутниковых изображений высокого пространственного разрешения <i>И.А. Пестунов, С.А. Рылов</i>	357
Интернет-сервис для построения интерферометрических моделей на основе данных ALOS L1.0 <i>В.П. Потапов, С.Е. Попов, А.В. Семенов</i>	362
Интеграция географических метаданных в информационные системы общего назначения посредством ретроспективного тезауруса <i>Д.М. Скачков, О.Л. Жижимов</i>	371
Геоинформационная система мониторинга шумового загрязнения городского центра <i>И.А. Суторихин, С.А. Литвиненко</i>	375
Реализация территориально-распределенной информационно-измерительной системы на основе автоматических метеостанций АМК-03 для мониторинга и прогнозирования опасных метеорологических явлений <i>А.А. Тихомиров, А.Я. Богушевич, В.В. Кольчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков</i>	377
Перспективы применения гидрохимичеки ориентированного программного комплекса для оценок ионного состава природных вод Кузбасса <i>Е.Л. Счастливец, С.Г. Пушкин, А.А. Воротилов</i>	382
Технология веб-публикации оперативных данных по лесным пожарам <i>А.В. Токарев</i>	388

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И
АНТРОПОГЕННЫХ КАТАСТРОФ**

О математическом моделировании возникновения и распространения природных пожаров

А.М. Гришин

Томский государственный университет

Физическая модель природной пожарной опасности

В работах [1-5] дан критический анализ существующих методик прогноза лесной пожарной опасности. Утверждается, что возникновение лесного пожара носит вероятностный характер и зависит не только от погодных условий и грозовой активности, но и от уровня антропогенной нагрузки, скорости ветра, влагосодержания растительных горючих материалов и реакционной способности этих материалов. Существуют стационарные и динамические модели лесной пожарной опасности. Схема возникновения лесных пожаров предложена в [2, 4] и изображена на рисунке 1.

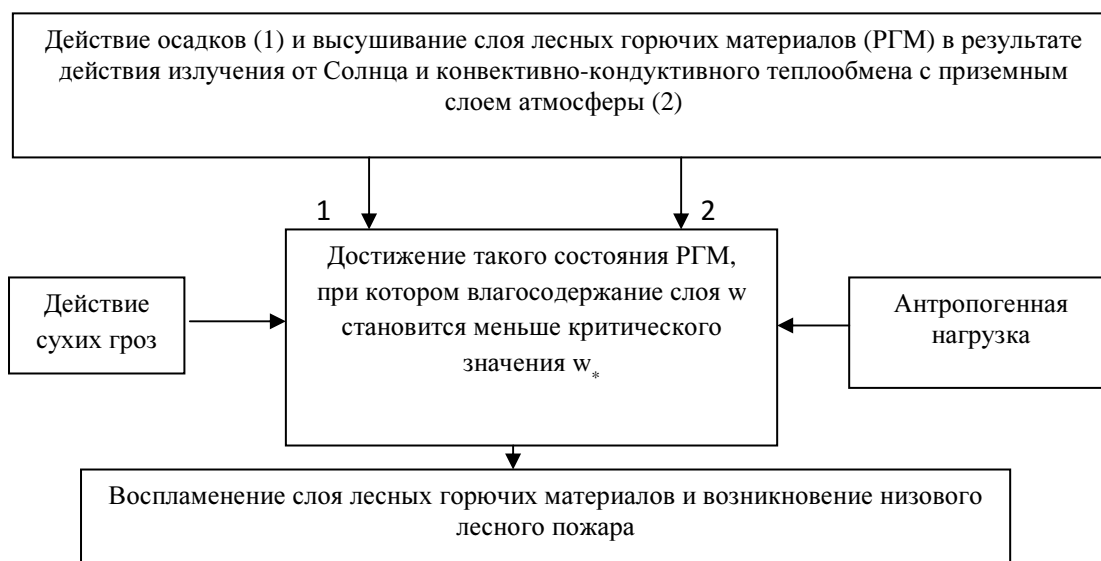


Рис. 1. Физическая модель природной пожарной опасности [1-8].

Математическая модель возникновения лесных пожаров

Используя теорию вероятностей и физические соображения, получаем следующую формулу (динамическую модель) для оценки вероятности возникновения лесного пожара [1-8] на лесной территории, где имеется N выделов¹

$$P_j = \sum_{i=1}^N \left[P_{ij}(A)P_{ij}(ЛП / A) + P_{ij}(M)P_{ij}(ЛП / M) \right] P_{ij}(C), \quad (1)$$

$$P_{ij}(C) = \begin{cases} 0, & W_{ij} > W_{i*}, \\ \frac{F_i}{F} \exp \left[-(\Delta W_{ij})^2 \right], & \Delta W_{ij} = \frac{W_{ij} - W_{i*}}{W_{i*}}, \quad 0 \leq W_{ij} \leq W_{i*}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь P_j – вероятность возникновения лесного пожара на контролируемой лесной территории в j -ый момент времени; F – площадь лесной территории конкретного лесхоза, района или области; F_i – площадь лесной территории (выдела), покрытой лесом i -го типа; N – общее число выделов на площади F ; $P_{ij}(A)$ – вероятность антропогенной нагрузки, достаточной для зажигания ЛГМ; $P_{ij}(ЛП/A)$ – вероятность возникновения пожара вследствие антропогенной нагрузки на площади F_i ; $P_{ij}(M)$ – вероятность возникновения сухих гроз на площади F_i ; $P_{ij}(ЛП/M)$ – вероятность возникновения лесного пожара от молнии при условии, что сухие грозы могут иметь место на площади F_i ; $P_{ij}(C)$ – вероятность возникновения лесного пожара по условиям погоды, W_{ij} и W_{i*} – текущее и критическое значение влагосодержания ЛГМ в j -ый момент времени на i -ом участке территории; если $W_{ij} > W_{i*}$, то низовой лесной пожар не возникает.

Таким образом, модель (1)–(2) является детерминировано-вероятностной, так как значения W_{ij} определяются с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих сушку ЛГМ [9, 10].

¹ Выдел – участок леса из пород деревьев одного типа.

Новая вероятностно-статистическая модель возникновения лесного пожара

Следует отметить, что антропогенные причины возникновения лесных пожаров многообразны: брошенные на землю непогашенные окурки сигарет A_1 ; тлеющие после выстрела из охотничьего ружья пыжи A_2 ; непогашенные костры A_3 ; искры из выхлопных труб автотранспорта A_4 ; взрывы нефте-, газопроводов A_5 ; техногенные пожары на буровых установках A_6 ; падение летательных аппаратов A_7 ; преднамеренные поджоги леса с целью последующей продажи A_8 ; преднамеренные поджоги леса для нанесения ущерба объектам, расположенным в лесу A_9 ; пожары, вызванные сфокусированными лучами Солнца на осколках битого стекла A_{10} . Кроме них существуют природные причины – действие молний на лесные горючие материалы при сухих грозах A_{11} , а также самовоспламенение лесных горючих материалов A_{12} .

Поэтому представляет интерес создание уточненной математической модели прогноза лесной пожарной опасности.

Основными характеристиками предлагаемой модели являются:

1. Отрезок времени t , в рамках которого изучается явление загорания лесных горючих материалов, называют лесопожарным периодом. Обычно это весна, лето и иногда осень текущего года.
2. Выдел, под которым понимают i -ый участок леса с конкретными типами и запасами лесных горючих материалов.
3. Общее число всех видов лесной пожарной опасности на рассматриваемом i -ом выделе леса $N_i^{(t)}$

для заданного времени t равно $N_i(t) = \sum_{n=1}^{12} N_{in}(t)$, где N_{in} – число опасностей A_n n -го вида на том

же выделе леса ($n=1$ соответствует загоранию лесных горючих материалов A_1 от окурков сигарет; $n=2$ – от тлеющих пыжей после выстрелов из охотничьих ружей; $n=3$ – от непогашенных костров; $n=4$ – от искр из выхлопных труб автотранспорта; $n=5$ – от взрыва нефте- и газопроводов при перекачке нефти и газа; $n=6$ – от техногенного пожара на буровых установках; $n=7$ – от падения летательных аппаратов; $n=8$ – от преднамеренных поджогов лесов для последующей продажи горелого леса; $n=9$ – от преднамеренных поджогов лесов с целью нанесения ущерба объектам, расположенным в лесу; $n=10$ – от действия лучей Солнца, сфокусированных осколками битого стекла; $n=11$ – от действия молний при сухих грозах; $n=12$ – от самовоспламенения лесных горючих материалов).

Вероятность возникновения лесного пожара от каждого вида опасности определяется по формуле

$$P_{in}(A_n, t) = \frac{N_{in}(t)}{N_i(t)}. \quad (3)$$

Из анализа (3) следует, что $P_{in}(A_n, t) < 1$ по определению, а вероятность всех лесных пожаров на i -том выделе равна

$$\sum_{n=1}^{12} P_{in}(A_n, t) = \sum_{n=1}^{12} \frac{N_{in}(t)}{N_i(t)} = 1, \quad (4)$$

где 12 – полное число опасностей возникновения лесных пожаров.

Наряду с независимыми друг от друга причинами возникновения лесных пожаров необходимо учитывать тот факт, что сырые лесные горючие материалы, влагосодержание которых больше критического, не горят. Кроме того, лесной пожар не возникает, если на i -ом выделе нет ЛГМ. Поэтому необходимо ввести величину вероятности того, что влагосодержание растительного горючего материала меньше критического

$$P_i(C, t) = \begin{cases} 0, & \text{при } W_{ij} > W_{i*} \text{ или при } m_i = 0, \\ \frac{F_i}{F} \left(1 - \frac{W_{ij}}{W_{i*}}\right)^k, & \text{при } 0 < W_{ij} \leq W_{i*}. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь W_{ij} – влагосодержание для j -го временного интервала на i -ом выделе максимального по массовой концентрации ЛГМ; W_{i*} – критическое влагосодержание на i -ом выделе максимального по массовой концентрации ЛГМ; m_i – масса ЛГМ на i -ом выделе; значение $P_i(C, t) = 0$ соответствует случаю, когда на i -ой площади лесной территории нет ЛГМ (поверхность дорог, рек, озер и водонасыщенных болот), т.е. $m_i = 0$, или на слой ЛГМ выпало более 3 мм осадков, в результате чего $W_{ij} > W_{i*}$; k – эмпирический показатель степени, характеризующий количественное изменение пожарной опасности; $F = \sum_{i=1}^N F_i$ – общая площадь той территории, для которой определяется лесная пожарная опасность (лесничество,

лесхоз, район, область или государство); F_i – площадь i -го выдела; N – общее число выделов на прогнозируемой территории.

Легко видеть, что по определению величина $P_i(C, t) < 1$.

Величина влагосодержания W_{ij} определяется с помощью известной математической модели сушки лесных горючих материалов [9, 10], W_{i*} определяется на основе экспериментальных данных.

Явление зажигания носит многофакторный вероятностный характер. На основании физической модели возникновения лесных пожаров (см. рис. 1) с учетом (3)–(5) и теоремы умножения вероятностей [11] получаем следующее выражение для возникновения лесных пожаров на i -ом выделе в момент времени t

$$P_i(t) = \sum_{n=1}^{12} P_i(A_n, t) P(\text{ЛП} / A_n, t) P_i(C, t). \quad (6)$$

Здесь $P_i(A_n, t)$ – вероятность существования конкретной i -ой антропогенной и природной нагрузки в момент времени t , достаточной для зажигания лесных горючих материалов; $P(\text{ЛП} / A_n, t)$ – вероятность возникновения пожара вследствие действия антропогенной и природной нагрузки j -ого типов в тот же момент времени t .

Формула вероятности зажигания $P_i(t)$ (6) получена с учетом всех поражающих факторов, в том числе и сухих гроз для i -го выдела. Величина $P_i(A_n, t) < 1$, так как представляет собой произведения вероятностей, которые меньше 1.

Все причины возникновения лесных пожаров можно разбить на антропогенные и природные.

К антропогенным причинам относятся все виды лесной пожарной опасности, обусловленные деятельностью человека. Эти виды опасностей соответствуют $P_i(A_n, t)$ при $n=1-10$, а природная пожарная опасность возникает в результате действия сухих гроз и самовоспламенения природных горючих материалов при $n=11,12$ [7]. Для упрощения вероятностной модели целесообразно ввести вероятность общей антропогенной нагрузки в любой момент времени на i -ом выделе в виде $P_i(A, t)$, а также вероятность общей природной пожарной опасности в виде $P_i(B, t)$.

В результате вместо (6) для одного i -го выдела получим более простую формулу для вероятности возникновения пожара

$$P_i(t) = [P_i(A, t) P_i(\text{ЛП} / A, t) + P_i(B, t) P_i(\text{ЛП} / B, t)] P_i(C, t). \quad (7)$$

Обычно лесная пожарная опасность в России оценивается в мае – сентябре для конкретных значений времени суток t . Введем обозначения $P_i(t) = P_{ij}$, $P_i(A, t) = P_{ij}(A)$, $P_i(B, t) = P_{ij}(B)$, $P_i(\text{ЛП} / A, t) = P_{ij}(\text{ЛП} / A)$, $P_i(\text{ЛП} / B, t) = P_{ij}(\text{ЛП} / B)$. Тогда формулу (7) можно переписать в виде

$$P_{ij} = [P_{ij}(A) P_{ij}(\text{ЛП} / A) + P_{ij}(B) P_{ij}(\text{ЛП} / B)] P_{ij}(C). \quad (8)$$

Формула (8) совпадает по физическому смыслу с выражением, предложенным в работах [2–5].

Величины $P_{ij}(A)$, $P_{ij}(\text{ЛП} / A)$, $P_{ij}(B)$, $P_{ij}(\text{ЛП} / B)$ можно найти, используя известное определение вероятности события через соответствующие частоты (статистическая модель риска [7]). В этом случае индекс j можно опустить.

$$P_i(A) \approx \frac{N_{Ai}}{N_{ПCi}}, \quad P_i(\text{ЛП} / A) \approx \frac{N_{ПАi}}{N_{КПи}}, \quad (9)$$

$$P_i(B) \approx \frac{N_{Mi}}{N_{ПCi}}, \quad P_i(\text{ЛП} / B) \approx \frac{N_{ПМи}}{N_{КПи}}. \quad (10)$$

Здесь N_{Ai} и $N_{ПАi}$ – количество дней пожароопасных сезонов для i -го выдела, когда имеется антропогенная нагрузка, достаточная для зажигания РГМ и количество пожаров вследствие этой нагрузки, включая и умышленные поджоги за некоторый период времени; $N_{КПи}$ – общее количество пожаров для i -го выдела за некоторый период времени; N_{Mi} и $N_{ПCi}$ – число дней для i -го выдела, когда имели место молнии (при сухих грозах) и общее число дней пожароопасных сезонов для i -го выдела за некоторый период времени; $N_{ПМи}$ – количество пожаров от молний при сухих грозах за некоторый период времени.

Для проверки получаемых результатов результаты расчетов вероятности возникновения лесных пожаров сравнивались с классами пожарной опасности (КПО), которые используются на практике [1] и рассчитываются при тех же самых условиях, определяемыми по комплексному показателю В.Г. Нестерова: I КПО – при показателе менее 300 единиц, II – КПО – от 301 до 1000, III – КПО от 1001 до 3000, IV КПО – 3001 до 10000, V КПО – более 10000 единиц.

Классы пожарной опасности (КПО) предлагаемой методики определялись следующим образом. Максимальная величина лесной пожарной опасности на i -ом выделе, которая может быть получена по

формуле (1) равняется $\frac{F_i}{F}$. Присвоим a_5 максимальное значение V КПО по методике Нестерова. Т.к. в методике Нестерова верхняя граница V КПО отсутствует, то будем считать что $a_5 = 50\ 000$ единиц. Обозначим буквами a_j – верхние границы классов засухи по методике Нестерова, а буквами P_{mi} – максимальные значения вероятности возникновения лесного пожара на i -ом выделе. Тогда общая формула, для определения границ местной шкалы прогноза лесной пожарной опасности, примет вид:

$$x_j = \frac{a_j P_{mi}}{a_5}, \quad P_{mi} = \frac{F_i}{F}, \quad j=1,2,3,4,5. \quad (11)$$

Здесь $j=1,2,3,4,5$ соответствует j -му классу пожарной опасности; F_i – выдел для которого дается прогноз; F – площадь лесничества.

В результате были получены следующие значения вероятности возникновения лесного пожара для разных классов лесной пожарной опасности Тимирязевского лесхоза:

$$\begin{aligned} 0 < \text{КПО}_1 \leq x_1 = a_1 P_{mi} / a_5, \\ x_1 = a_1 P_{mi} / a_5 < \text{КПО}_2 \leq x_2 = a_2 P_{mi} / a_5, \\ x_2 = a_2 P_{mi} / a_5 < \text{КПО}_3 \leq x_3 = a_3 P_{mi} / a_5, \\ x_3 = a_3 P_{mi} / a_5 < \text{КПО}_4 \leq x_4 = a_4 P_{mi} / a_5, \\ x_4 = a_4 P_{mi} / a_5 < \text{КПО}_5 \leq x_5 = P_{mi}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для доказательства достоверности предлагаемой детерминированно-вероятностной методики проведен ретроспективный анализ [10] 202 возгораний в Тимирязевском лесхозе с учетом конкретных метеоусловий и антропогенной нагрузки на леса в 2000-2004 годах. Проведено сравнение класса пожарной опасности (КПО) на день обнаружения пожара по методике Нестерова (в настоящее время является ГОСТом при оценке пожарной опасности в России [1]) и детерминированно-вероятностной методики прогноза лесной пожарной опасности (5), (8)-(10) для Тимирязевского лесхоза Томской области.

Из анализа полученных данных следует, что в 55,5 % случаев прогноз по предлагаемой методике дает более высокий КПО на день обнаружения пожара, чем по методике Нестерова, в 41 % равный КПО с методикой Нестерова и только в 3,5 % ниже. Этот результат свидетельствует о том, что новая методика прогноза лесной пожарной опасности более точно указывает на день возникновения пожара.

Новую систему прогноза лесной пожарной опасности рекомендуется использовать для получения оперативного прогноза (на три часа), дневного прогноза (по утренним данным), краткосрочного прогноза (на неделю), сезонного прогноза (на месяц).

Об осреднении вероятностей возникновения природных пожаров

Среднее значение вероятности \bar{P}_i за определенный промежуток времени

$$\bar{P}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_*} P_i(t) dt, \quad (13)$$

где $\Delta t = t_* - t_0$, t_* – конечное время наблюдения, t_0 – начальное время наблюдения.

В пожароопасный период целесообразно использовать среднечасовую вероятность возникновения пожара

$$\bar{P}_{ij} = \frac{1}{t_{j+1} - t_j} \int_{t_j}^{t_{j+1}} P_i(t) dt. \quad (14)$$

С учетом (7) и (14) для j -го интервала времени для лесной территории, состоящей из N выделов, получаем более общую формулу, чем (1)

$$\bar{P}_j = \sum_{i=1}^N \left[\bar{P}_{ij}(A) \bar{P}_{ij}(ЛП / A) + \bar{P}_{ij}(B) \bar{P}_{ij}(ЛП / B) \right] \bar{P}_{ij}(C). \quad (15)$$

Таким образом, формула (15) обобщает ранее полученную в работах [2-5] формулу (1).

Следует отметить, что формулы (1), (2), (9), (10) и (13) можно использовать и для прогноза торфяной и степной пожарной опасности, однако вместо дифференциальных уравнений, описывающих сушку лесных горючих материалов следует использовать аналогичные уравнения для описания сушки торфяников [3] и степных горючих материалов [11].

О детерминированном моделировании природных пожаров

Надо сказать, что наряду с вероятностными моделями возникновения природных пожаров в работах [1–11] были предложены детерминированные математические модели в виде уравнений в частных производных с соответствующими граничными и начальными условиями.

В работах [12–15] даны методы решения прямых и обратных задач механики реагирующих сред, и в том числе итерационно-интерполяционный метод для численного решения о возникновении и распространении природных пожаров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №11-01-00228 и гранта РФФИ-Франция № 10-01-91054.

Литература

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. Изд-во ТГУ, Томск, 1981. 277 с.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: "Наука", 1992. 407 с.
3. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики, 2002. С. 41-89.
4. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. Томск, Изд-во ТГУ, 1994. 207 с.
5. Гришин А.М., Бурасов Д.М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров. Кемерово: Изд-во Практика, 2006. 134 с.
6. Гришин А.М., Фильков А.И. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров. Кемерово, Изд-во «Практика». 2005. 201 с.
7. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф (основные определения и понятия теории катастроф и общие закономерности их возникновения и развития) Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 122 с.
8. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч.1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 524 с.
9. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч.2. Кемерово, Изд-во «Практика». 2005. 560 с.
10. Гришин А.М., Петрин С.В., Петрина Л.С. Моделирование и прогноз катастроф. Ч.3. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 575 с.
11. Гришин А.М., Якимов А.С. Математическое моделирование процесса зажигания торфа // ИФЖ. 2008. Т.81, №1. С. 191–199.
12. Гришин А.М., Зинченко В.И., Кузин А.Я., Сеницын С.П., Трушников В.Н. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 418 с.
13. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваев В.В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях. Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011, №2(14). С. 91-102.
14. Гришин А.М. О ведущей научно-педагогической школе «Сопряженные задачи механики многофазных реагирующих сред, информатики и экологии». Кемерово: Изд-во Кемерово: ИНТ, 2011. 208 с.
15. Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н., Субботин А.Н., Якимов А.С. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Учебное пособие с грифом УМС по математике и механике УМО Министерства образования и науки РФ. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 320 с.

Математическая модель зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным солнечным излучением для мониторинга неустановленных причин возникновения лесных пожаров

Н.В. Барановский, Г.В. Кузнецов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Введение

Причины возникновения лесных пожаров достаточно разнообразны [9] и могут иметь как антропогенное, так и природное происхождение. Однако, в статистических данных заметная доля пожаров фигурирует с формулировкой “причина возникновения не установлена” [9] или “по вине человека”. Причем последний вариант используется достаточно часто, если истинная причина возгорания не установлена. Например, нередко в средствах массовой информации все причины пожаров разделяют на две группы: “следствие грозовой активности” и “по вине человека”. При таком подходе к оценке причин возникновения пожаров трудно разрабатывать конкретные мероприятия по предотвращению лесных пожаров. В тоже время, согласно правилам пожарной безопасности в лесах запрещается разбрасывать стеклянные бутылки [12,13], так как они или их осколки могут сфокусировать солнечное излучение и вызвать возгорание ЛГМ.

В последние годы интенсивно развивается теория детерминированно-вероятностного прогноза лесной пожарной опасности [1-3]. Детерминированные компоненты этой теории представлены математическими моделями зажигания ЛГМ, описывающими достаточно подробно физико-химические процессы тепломассопереноса, которые предшествуют непосредственному возгоранию [6,8,10]. Но в работах [6,8,10] рассмотрены в качестве источников нагрева ЛГМ только грозовые разряды [8,10] и нагретые до высоких температур частицы [6]. До настоящего времени теоретический анализ условий возгорания ЛГМ под действием солнечного излучения не проводился. В частности, нет достоверных оценок минимальных значений радиационных тепловых потоков, при которых возможно зажигание, например, сухой хвои. Для мониторинга и прогноза лесных пожаров по таким неочевидным причинам, как сфокусированное солнечное излучение, следует разработать соответствующие методики прогноза на основе детерминированных моделей зажигания ЛГМ радиационным тепловым потоком.

Цель исследования – численное моделирование условий зажигания слоя ЛГМ в результате воздействия сфокусированного потока солнечного излучения.

Постановка задачи

В настоящей работе рассматривается сценарий катастрофической пожарной опасности, когда влага в ЛГМ отсутствует. События 2010 года в европейской части России показали, что разработка таких моделей имеет высокий уровень актуальности.

Принята следующая схема исследуемого процесса. На подстилающей поверхности расположен слой ЛГМ, на малом участке которого фокусируется поток солнечного излучения. Процессы, происходящие в фокусирующем элементе, не моделируются в связи с отсутствием, как экспериментальных данных, так и результатов теоретических исследований по этой проблеме. Слой ЛГМ нагревается и термически разлагается с образованием газообразных продуктов пиролиза. Состав газовой смеси принимается трехкомпонентным (горючее – монооксид углерода, окислитель – кислород, инертные компоненты). Продукты пиролиза диффундируют в область газовой смеси. При определенных температуре и концентрациях реагирующих газов происходит зажигание смеси. Приняты следующие критерии зажигания: 1) теплоприход от химической реакции превышает тепловой поток от нагретой поверхности в область газовой смеси; 2) температура в газовой смеси достигает критического значения. На рис. 1 представлена геометрия области решения. Символами Γ обозначены границы области решения и различных слоев.

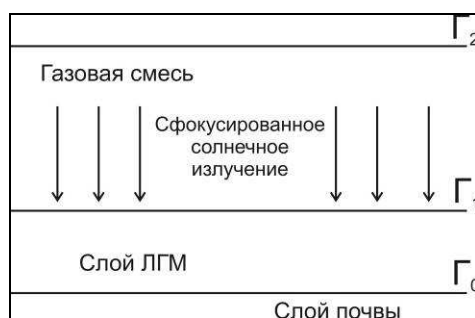


Рис. 1. Область решения

Процесс воспламенения слоя ЛГМ сфокусированным потоком солнечного излучения описывается системой одномерных нестационарных нелинейных уравнений теплопроводности и диффузии (1), (2), (6), (9) с соответствующими начальными и граничными условиями. Численная реализация проведена с использованием конечно-разностного метода [14]. Разностные аналоги одномерных уравнений теплопроводности и диффузии решены методом прогонки в сочетании с методом простой итерации [14]. Алгоритм программы был протестирован на различных задачах теплопроводности [7].

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_p k_1 \rho_3 \phi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right). \quad (1)$$

Уравнение энергии для газовой смеси:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} + q_5 (1 - \nu_5) R_5. \quad (2)$$

Граничные условия для уравнений (1), (2):

$$\Gamma 0 \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad (3.1)$$

$$\Gamma 1 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} + q_s, \quad T_1 = T_2, \quad (3.2)$$

$$\Gamma 2 \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}. \quad (3.3)$$

Начальные условия для уравнений (1), (2):

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}, \quad i = 1, 2. \quad (4)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} = -k_p \rho_1 \phi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad \phi|_{t=0} = \phi_0. \quad (5)$$

Уравнение диффузии для окислителя:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_4}{\partial z^2} - \frac{M_4}{M_5} R_5. \quad (6)$$

Граничные условия для уравнения (6):

$$\Gamma 1 \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0, \quad (7.1)$$

$$\Gamma 2 \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial z} = 0. \quad (7.2)$$

Начальные условия для уравнения (6):

$$C_4|_{t=0} = C_{4.0}, \quad (8)$$

Уравнение диффузии для горючих компонент пиролиза:

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_5}{\partial z^2} - R_5, \quad (9)$$

Граничные условия для уравнения (9):

$$\Gamma 1 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = Y_5, \quad (10.1)$$

$$\Gamma 2 \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial z} = 0. \quad (10.2)$$

Начальные условия для уравнения (9):

$$C_5|_{t=0} = C_{5.0}. \quad (11)$$

Уравнение баланса массы:

$$\sum_{i=4}^6 C_i = 1. \quad (12)$$

Начальные условия для уравнения (12):

$$C_6|_{t=0} = C_{6.0}. \quad (13)$$

Выражение для массовой скорости реакции R_5 [4]:

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT_1}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0.25} x_2, & x_1 > 0.05 \\ x_1 x_2, & x_1 \leq 0.05 \end{cases}, \quad (14)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^6 \frac{C_k}{M_k} M_i}, \quad (15)$$

где T_i , ρ_i , c_i , λ_i – температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность (1 – слоя ЛГМ, 2 – воздуха); C_i , M_i – концентрация и молярная масса (4 – окислителя, 5 – горючего газа, 6 – инертных компонентов воздуха); q_p – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_1 – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_1 – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; ϕ – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; q_5 – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода; v_5 – доля теплоты поглощенная слоем ЛГМ; R_5 – массовая скорость реакции окисления оксида углерода; α_1 – коэффициент теплопередачи; α_2 – коэффициент теплоотдачи; k_5 – предэкспонент реакции окисления оксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления оксида углерода; D – коэффициент диффузии, Y_5 – поток массы горючих продуктов пиролиза, x_i – вспомогательная переменная; q_s – поток сфокусированного солнечного излучения. z – пространственная координата. t – временная координата. Индексы “es” “ea”, “н” соответствуют параметрам окружающей среды в почве, воздухе и в начальный момент времени соответственно.

При численном моделировании использованы следующие исходные данные: $\rho_1 = 500 \text{ кг/м}^3$; $\rho_2 = 0.1 \text{ кг/м}^3$; $c_1 = 1400 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_2 = 1200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\lambda_1 = 0.102 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_2 = 0.1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $q_p = 1000 \text{ Дж/кг}$; $k_1 = 3.63 \cdot 10^4$; $E_1 / R = 9400 \text{ К}$; $\phi_{\text{н}} = 1$; $q_5 = 107 \text{ Дж/кг}$; $k_5 = 3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$; $E_5 / R = 11500 \text{ К}$; $v_5 = 0.3$; $\alpha_1 = 20 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $\alpha_2 = 80 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $D = 10^{-6}$; $M_4 = 0.032$; $M_5 = 0.028$; $M_6 = 0.044$.

Результаты и их обсуждение

Задачей исследования было определение нижнего предела потока сфокусированного солнечного излучения, при котором возможно воспламенение слоя ЛГМ. В таблице 1 представлены результаты численного расчета времени задержки воспламенения. Также представлены известные экспериментальные данные [5]. Нижний предел q_s , при котором возможно воспламенение слоя ЛГМ, по результатам численного исследования составил 15 кВт/м^2 . Эта величина примерно 10-кратно превышает значение несфокусированного теплового потока солнечной радиации [11]. Среднее отклонение результатов численного моделирования от экспериментальных данных [5] составило около 42%. Согласно [4] погрешность решения задач теории лесных пожаров лежит в пределах от 15 до 580%. Таким образом, полученные результаты можно считать удовлетворительными с точки зрения соответствия теоретических результатов экспериментальным данным [5]. Следует отметить, что разность теоретических и экспериментальных значений времени задержки воспламенения уменьшается с увеличением величины потока сфокусированного излучения.

Таблица 1. Время задержки воспламенения слоя ЛГМ лучистым тепловым потоком.

Тепловой поток, q_s , кВт/м ²	Время задержки воспламенения (расчет), t_{ign} , с	Время задержки воспламенения (эксперимент [5]), t_{ign} , с
15	96	Нет зажигания
20	59	197-207
25	31	93-100
30	24	40-42
35	20	27-30
40	18	18-26

Можно также отметить, что экспериментальные значения времен задержки воспламенения во всем диапазоне изменения q_s превышают теоретические. Это очевидно обусловлено наличием влаги в ЛГМ в экспериментах [5]. Кроме того, все ЛГМ существенно отличаются по своему составу. Соответственно, и отличаются термохимические характеристики, например, сосновой хвои из разных регионов России и Белоруссии. Различные кинетические параметры процессов пиролиза хвои, с которой проводились эксперименты [5] и хвои, для которой велось численное моделирование, являются источником определенных отклонений по временам задержки воспламенения ЛГМ.

Типичное распределение температуры по вертикальной координате в системе “слой ЛГМ-газовая смесь” в момент зажигания представлено на рисунке 2.

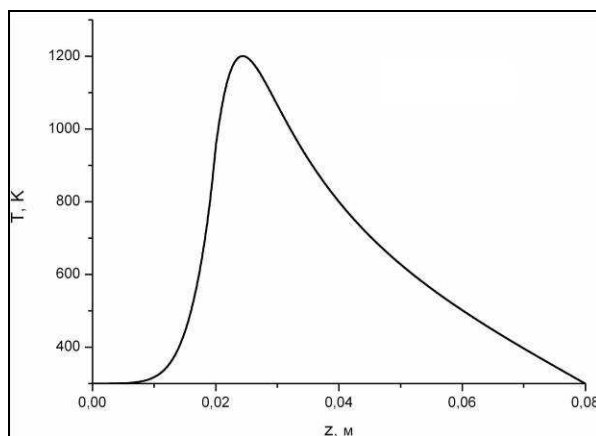


Рис. 2. Распределение температуры в системе “слой ЛГМ-газовая смесь” в момент зажигания при $q_s = 15000 \text{ Вт/м}^2$.

Пик на температурной кривой соответствует месту локализации химической реакции окисления монооксида углерода до диоксида углерода. На рисунке 3 представлены распределения концентраций компонент в газовой фазе в момент зажигания.

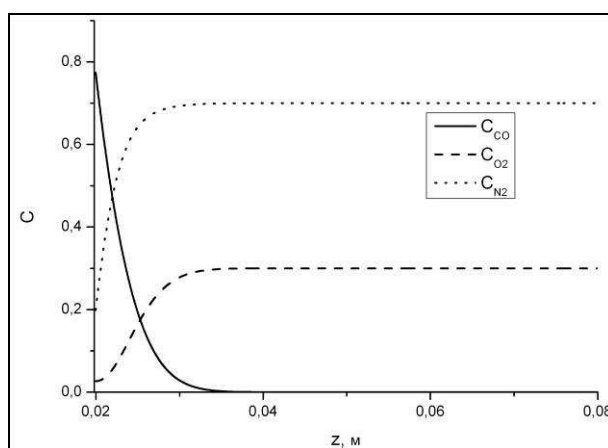


Рис. 3. Распределение компонентов газовой фазы в момент зажигания при $q_s = 15000 \text{ Вт/м}^2$.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о большой вероятности возгораний сухих ЛГМ при воздействии на них концентрированных потоков солнечного излучения. Причем степень концентрации энергии не очень высока и представляется вполне достижимой на практике в случае прохождения солнечного излучения не только через пустые или частично наполненные водой емкости (стеклянные банки или бутылки) или их осколки, но, возможно, и через большие капли смолы хвойных деревьев.

Заключение

На основании результатов выполненных теоретических исследований можно сделать вывод о целесообразности учета рассмотренного в данной работе фактора в системах прогноза лесной пожарной опасности. Решение поставленной задачи имеет важное значение для развития теории зажигания ЛГМ. Полученные результаты создают базис для дальнейшего развития физико-математических моделей зажигания ЛГМ и других пожароопасных материалов.

Литература

1. Барановский Н.В. Модель прогноза и мониторинга лесной пожарной опасности // Экология и промышленность России. 2008. № 9. С. 59–61.
2. Барановский Н.В. Концептуальная база российской системы прогноза лесной пожарной опасности // Безопасность в техносфере. 2010. № 6. С. 34–42.
3. Барановский Н.В., Кузнецов Г.В. Конкретизация неустановленных причин в детерминированно-вероятностной модели прогноза лесной пожарной опасности // Пожаровзрывобезопасность. 2011. Т. 20, № 6. С. 24–27.
4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 С.

5. Касперов Г.И., Гоман П.Н. Исследование пожароопасных свойств лесных горючих материалов сосновых насаждений // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. Вып. XVIII. С. 337–340. (Беларусь)
6. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2006, Т. 15. № 4, С. 42–46.
7. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 С.
8. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 3. С. 41–45.
9. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 С.
10. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании листового дерева наземным грозовым разрядом // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 24. № 1. С. 122–132.
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Вып. 20. (Томская, Новосибирская, Кемеровская области и Алтайский край). Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1993. 718 С.
12. Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах: постановление Правительства РФ от 30 июня 2007 г. № 417 // Пожарная безопасность. 2007. № 4. С. 3
13. О внесении изменений в Правила пожарной безопасности в лесах: Постановление Правительства РФ от 5 мая 2011 г. № 343.
14. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1983. С. 33–36.

Об одной нестационарной модели движения примесей в закрытых водоемах

Л.В. Бондарева

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

В Кузбассе для утилизации жидких отходов углеперерабатывающих предприятий и углеобогачительных фабрик используются отработанные горные выработки затопленных угольных шахт. Загрязненные сточные воды закачиваются в шахту, где происходит процесс их естественной очистки за счет оседания взвешенных в жидкости твердых частиц и разбавления фильтрующимися через свод шахтного свода грунтовыми водами. Для поддержания уровня грунтовых вод в регионе постоянно осуществляется забор жидкости из шахты. В настоящее время данная технология применяется на шахте Кольчугинской рис 1.

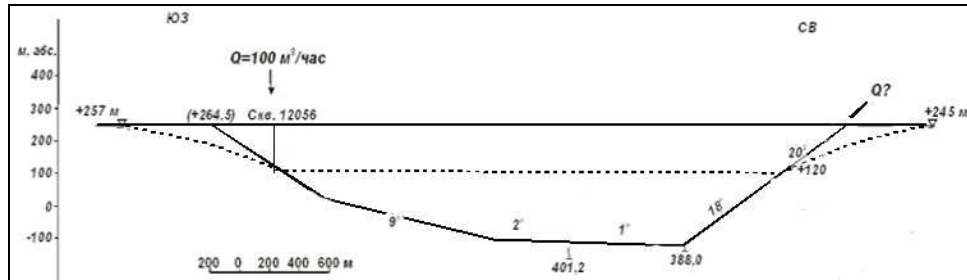


Рис. 1 Схема ш. Кольчугинская.

Внутри шахты постоянно происходит накопление твердого осадка на дне. Образовавшийся твердый осадок не сносится течением и может значительно изменить форму дна или даже перекрыть основной ток подаваемой на входе жидкости. В результате этого может снизиться очистительная способность выработки, что приведет к необходимости вывода ее из эксплуатации.

Использование стационарной модели течения для исходной задачи не позволяет моделировать накопление твердого осадка в горной выработке, т.к. при «заиливании» происходит изменение формы выработанного пространства и тем самым меняется гидродинамика течения. Для решения этой проблемы была разработана нестационарная модель течения жидкости.

При построении математических моделей течения жидкости и распространения примесей в затопленных горных выработках считаем, что примесь не влияет на течение, в связи с чем сначала находится картина течения, после чего на нее накладывается распространение примеси.

Для определения поля скоростей, решается система уравнений Навье - Стокса в переменных функция тока – вихрь (1)-(2) с соответствующими начальными и краевыми условиями для скоростей, вихря и функции тока (3)-(5).

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\nabla(Vw) + \frac{1}{Re} \Delta w + w \nabla V, \quad (1)$$

$$\Delta \psi = -w \quad (2)$$

$$V|_{t=0} = 0, \quad V|_{\partial G} = V(x, y, t), \quad (3)$$

$$w|_{t=0} = 0, \quad w|_{\partial G} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{\partial G}, \quad (4)$$

$$\psi|_{t=0} = 0, \quad \psi|_{\partial G} = \psi(x, y, t), \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса, ∇ – градиент, Δ – оператор Лапласа.

Рассматривается течение жидкости в области, приведенной на рис. 2, которая является двумерным аналогом шахты Кольчугинской, используемой как очистное сооружение. Данная геометрия характеризуется своими размерами: a – высота ствола, постоянная от входного до выходного отверстия, b – высота наклонной части выработки, c – длина основной, горизонтальной части ствола, d – длина дополнительных входного и выходного сегментов. Предполагаем, что угол наклона боковых частей выработки к горизонтальным равен 45° .

На твердых стенках $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_5, \Gamma_7, \Gamma_8$ ставятся условия прилипания. На входном и выходном отверстиях Γ_1, Γ_6 и верхней кровле Γ_4 используются параболические профили скоростей, изменяющиеся от 0 до 1. Соотношение между значениями скоростей выбирается таким образом, что выполняется соотношение баланса между втекающей и вытекающей жидкостью. Из постановки задачи считаем, что объем фильтруемых через верхнюю кровлю грунтовых вод превосходит объем подаваемых шламовых вод.

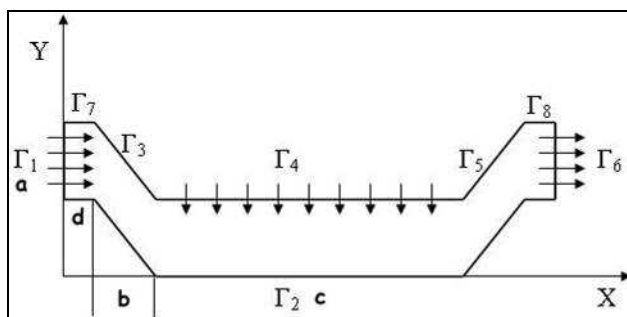


Рис. 2. Вид области решения.

Распространение примеси описывается уравнением переноса

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + (v - v_s) \frac{\partial C}{\partial y} = D \Delta C, \quad (6)$$

где $C = C(t, x, y)$ — концентрация примеси, (u, v) — компоненты вектора скорости основного течения, v_s — скорость оседания примеси, D — коэффициент диффузии, Δ — оператор Лапласа.

Для уравнения переноса (6) начальные условия могут быть записаны в виде

$$C(0, x, y) = C_0,$$

где $C_0 = C_0(x, y)$ — начальная концентрация, а граничные условия заданы следующим образом:

$$\Gamma_1 : C = C_1; \quad \Gamma_2 : \frac{\partial C}{\partial y} = \alpha C; \quad \Gamma_3, \Gamma_5, \Gamma_7, \Gamma_8 : \frac{\partial C}{\partial y} = 0; \quad \Gamma_4 : C = C_2; \quad \Gamma_6 : \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

где C_1 — концентрация загрязнения в жидкости, поступающей в шахту через входное отверстие, C_2 — концентрация вещества в фильтрующихся грунтовых водах, α — константа, отражающая интенсивность образования возле дна геля с повышенной концентрацией загрязнения и выпадения твердого осадка при оседании. Если $\alpha = 0$, то образования твердого осадка и накопления примеси не происходит.

Поставленная дифференциальная задача аппроксимируется на равномерной конечно — разностной сетке с шагом h_x, h_y по пространственным переменным со вторым порядком и шагом τ по времени. Для решения разностной задачи для ω и s используется схема стабилизирующих поправок первого порядка по τ и второго порядка по h [3], а для разностной задачи для ψ — метод минимальных невязок неполной аппроксимации [1,2].

Процесс образования твердого осадка на дне горной выработки моделируется следующим образом: считаем, что если на протяжении некоторого времени (разного для каждой примеси) в (i, j) -м расчетном узле конечно-разностной сетки находится примесь, концентрация которой превышает заданную величину C^* в течение времени T^* , тогда (i, j) узел становится нерасчетными, и тем самым область решения изменяется.

Каждый вид примеси идентифицируется набором коэффициентов, отвечающим за ее свойства: D, v_s, α, C^*, T^* . Таким образом, выбирая соответствующие значения коэффициентов можно моделировать разные виды примесей.

На рис. 3-4 предоставлены расчеты задачи с учетом образования осадка на дне, демонстрирующие изменение распространения примеси и изменение формы канала и поля скоростей с течением времени и накоплением осадка на дне, происходящем все это время, в зависимости от коэффициента α .

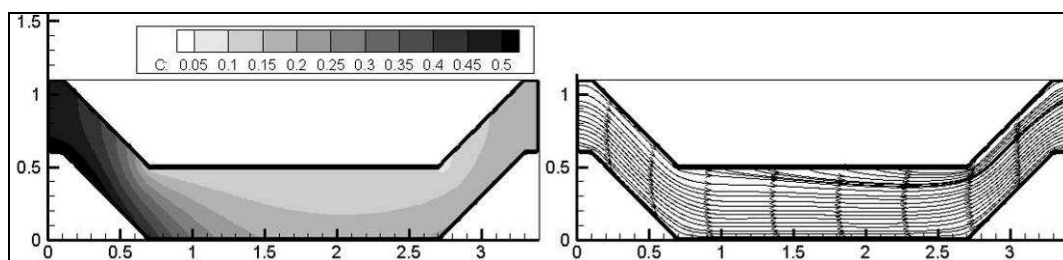


Рис. 3. $h_x = h_y = 0.02$, $\tau = 0.01$, $D = 0.5$, $v_s = 0.5$, $C_1 = 0.5$, $C_2 = 0.1$, $\alpha = -1$, $C^* = 0.6$, $T^* = 500$, $T = 6$.

На рис. 3 представлен расчет на шаге по времени $T = 6$. Примесь наибольшей концентрации накапливается вдоль нижней наклонной границы вблизи входного отверстия, концентрация примеси на выходе много меньше, чем на входе; на данный шаг по времени не происходит «заиливания» дна. Треки

движения частиц направлены вдоль канала, вдоль верхней кровли наблюдается их выгибание вниз за счет фильтрации воды.

Однако если при тех же входных условиях увеличить значение коэффициента α до значения равного -2 (см. рис. 4), то картина распространения примеси кардинально меняется: на нижней наклонной границе вблизи входного отверстия накапливается твердый несмываемый осадок. Образуется «ступенька», которая при последующем счете перекрывает основной ток жидкости от входного отверстия. В основании «ступеньки» образуется область с меньшим значением концентрации примеси, так как находившаяся там примесь уже снеслась течением, а новая почти не поступает, оседая на ступеньке. Наблюдается значительное оседание примеси вдоль наклонной границы вблизи выходного отверстия с выбросом примеси высокой концентрации, по сравнению с концентрацией примеси на входе, из выработки.

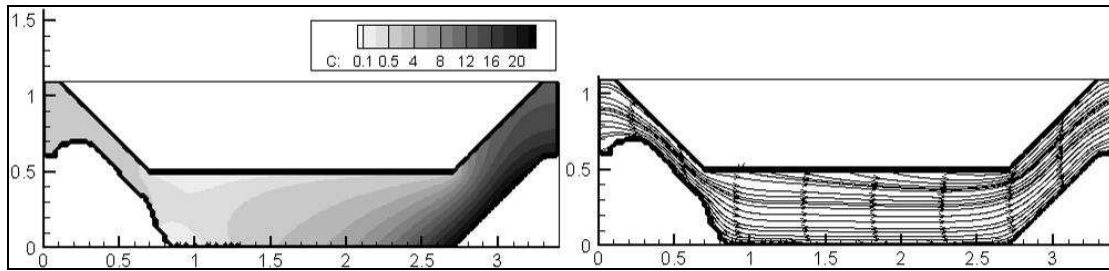


Рис. 4. $h_x = h_y = 0.02$, $\tau = 0.01$, $D = 0.5$, $v_s = 0.5$, $C_1 = 0.5$, $C_2 = 0.1$, $\alpha = -2$,
 $C^* = 0.6$, $T^* = 500$, $T = 18.3$.

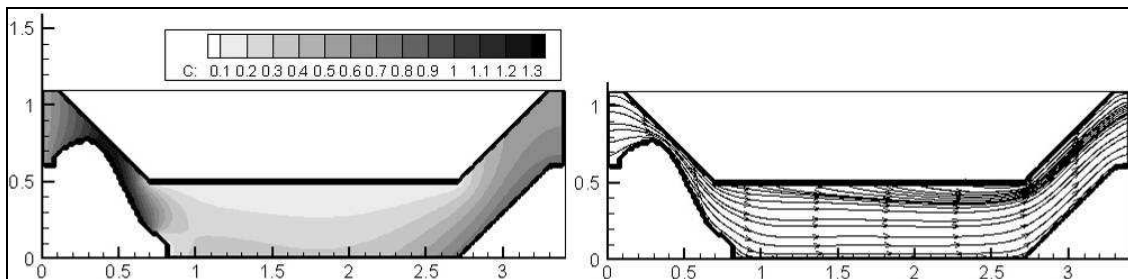


Рис. 5. $h_x = h_y = 0.02$, $\tau = 0.01$, $D = 0.1$, $v_s = 0.1$, $C_1 = 0.5$, $C_2 = 0.1$, $\alpha = -1.5$,
 $C^* = 0.6$, $T^* = 500$, $T = 1.83$.

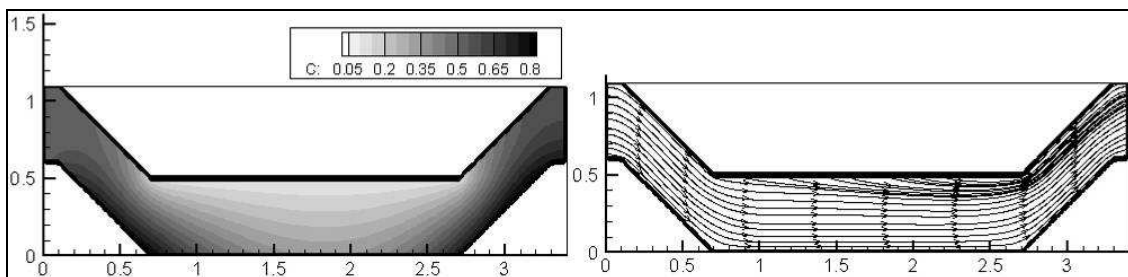


Рис. 6. $h_x = h_y = 0.02$, $\tau = 0.01$, $D = 0.1$, $v_s = 0.1$, $C_1 = 0.5$, $C_2 = 0.1$, $\alpha = -1.5$,
 $C^* = 1$, $T^* = 500$, $T = 1.83$.

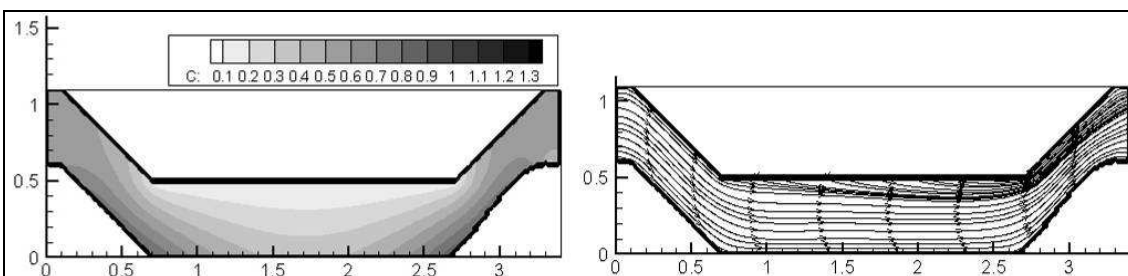


Рис. 7. $h_x = h_y = 0.02$, $\tau = 0.01$, $D = 0.1$, $v_s = 0.1$, $C_1 = 0.5$, $C_2 = 0.1$, $\alpha = -1.5$,
 $C^* = 1$, $T^* = 500$, $T = 30$.

На рис. 5-7 представлены расчеты, демонстрирующие влияние коэффициента C^* на картины течения и «заиливания». Шаг по времени $T = 18.3$. При значении $C^* = 0.6$ (см. рис. 5) «ступенька» образуется вдоль наклонной границы вблизи входного отверстия, но при увеличении значения параметра до $C^* = 1$ на том же шаге по времени «заиливания» не наблюдается (см. рис. 6).

При продолжении счета по времени до $T = 30$ картина меняется (см. рис. 7). «Ступенька» образуется вдоль нижней наклонной границы вблизи выходного отверстия.

Полученные расчеты показывают, что процесс «заиливания» выработки напрямую зависит от примеси, закачиваемой в выработку. В зависимости от значений параметров интенсивности образования твердого осадка вдоль нижней границы α и концентрации затвердевающей примеси C^* может происходить перекрытие основного тока подаваемой через входное отверстие жидкости, выброс примеси большой концентрации из выработки или же примесь будет оседать внутри выработки без ее заиливания на протяжении интересующего интервала времени.

Литература

1. Захаров Ю.Н. Градиентные итерационные методы решения задач гидродинамики. Новосибирск: Наука, 2004.
2. Захаров Ю.Н., Кривушин С.А. Метод минимальных невязок решения системы уравнений Навье – Стокса // Вестник Кем. гос. ун-та. Математика. Вып. 4. Кемерово, 2000. С.108–113.
3. Яненко Н.Н. Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики. М.: Наука, Сибирское отделение АН, 1967.

Об одном методе восстановления параметров выбросов в атмосферу от пылящего неорганизованного источника

А.А. Быков, М.Ю. Захаров

Института вычислительных технологий СО РАН (кемеровский филиал), Кемерово

Введение

В настоящее время Кемеровская область является основным угледобывающим регионом России. Концентрация производства на незначительной территории вызывает высокую экологическую нагрузку на природные комплексы, в том числе и на атмосферу. Выбросы угледобывающих предприятий, составляющие четверть суммарного по области выброса, содержат большой процент пылевых частиц, загрязняющих не только атмосферу, но и подстилающую поверхность. Поэтому, как научный интерес, так и практическую значимость представляет модельная оценка выпадения и накопления пылевых выбросов на сельскохозяйственных землях, в снеговом покрове, в бассейнах рек и т.д.

Для проведения количественной оценки осаждения твердых частиц на заданную территорию авторами разработана и доведена до практического использования локальная модель расчета суммарного потока пылевых частиц промышленного происхождения на подстилающую поверхность за длительный (год, сезон) промежуток времени [1]. Рассмотрение особенностей построения модели и ее информационного обеспечения [2] показывает, что одной из весьма значимых причин возникновения существенных погрешностей при расчетах является отсутствие информации о дисперсном составе выбросов таких характерных для угледобычи неорганизованных источников как перегрузка угля, работа горной техники, отсыпка и пыление отвалов. Для выяснения свойств отвалов как источников выброса в атмосферу пылевых частиц, рассмотрим их более подробно.

Причиной образования отвалов при разработке угольных месторождений является удаление больших масс покрывающих и вмещающих пород, годовые объемы которых в несколько раз превышают объемы добываемого угля. Породы, поступающие в отвал, образуются за счет проходки выработок, их ремонта и восстановления. В литологическом отношении отвалы представлены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, углем и другими породами. В них присутствует древесина, металлические предметы. Породы неоднородны по гранулометрическому составу, имеют размер от глинистых частиц до глыб. В зависимости от технологии отвалообразования формируются отвалы следующих типов: конические (терриконы), хребтовые и плоские. Отвалы принимают породу от отдельной шахты, разреза, обогатительной фабрики или от группы угольных предприятий. Они имеют четко выраженное слоистое строение, предопределенное особенностями технологии отсыпки. Обычным является чередование крупнообломочных слоев со слоями мелочи. Крупные глыбы нередко скатываются к подошве отвала, а максимальное количество мелкого материала (прежде всего глинистого) накапливается в вершинной его части. Таким образом, любой отвал является источником пылевых частиц различного химического и дисперсного состава. Естественно, в случае самовозгорания отвал выбрасывает и газообразные примеси, которые не влияют на процессы осаждения и в дальнейшем не рассматриваются.

Оценить суммарный (без детализации по дисперсному составу) выброс пылевых частиц с поверхности отвала можно с использованием методики [3], используемой для проектных работ. При этом важной информацией, как для расчета выброса, так и для расчета дальнейшего загрязнения атмосферы и почвы являются его геометрические размеры. Обзор данных показывает, что на предприятиях Кузбасса характерный горизонтальный размер пылящих отвалов и складов угля изменяется от 30 до 500 метров, а высота от 5 до 60 метров.

Как отмечалось ранее, точность результатов моделирования долгопериодного осаждения во многом зависит от правильного задания параметров источника и его выброса, одним из которых является дисперсный состав выбрасываемых пылевых частиц. Получить данный состав можно, конечно же, путем прямого эксперимента. Однако это не так-то просто, особенно для неорганизованных источников значительных размеров, к которым относятся отвалы. Поэтому в данной работе предлагается рассмотреть возможность восстановления неизвестного дисперсного состава неорганизованного выброса на основе экспериментальных исследований краткосрочного суммарного осаждения пыли на различных расстояниях от источника с параллельной фиксацией метеопараметров. Очевидно, что для этого, прежде всего, необходима модель расчета осаждения за небольшой интервал времени, порядка 1 часа. Такая модель позволит провести решение вариационной задачи по выбору параметров выброса, обеспечивающих наилучшее соответствие расчета с данными наблюдений. Огромное число необходимых для этого вычислений требует разработки эффективной вычислительной схемы и ее программной реализации.

Модель

Рассмотрим модель отвала, которая в простейшем варианте будет выглядеть так, как представлено на рис. 1, где: H – высота всего отвала, м; U – скорость ветра, м/с; Cl – класс устойчивости атмосферы по

схеме Пасквилла [4]. Предположим, что проведен эксперимент, в результате которого удалось измерить количество осевшей пыли (г/м^2) в нескольких точках X_{c1} , X_{c2} , X_{c3} и т.д. вдоль по ветру с подветренной стороны от источника. При этом предполагается, что для всего времени T (сек) проведения эксперимента метеорологические параметры, которые определяют процесс переноса примеси, остаются неизменными (тем самым обеспечиваются условия стационарности).

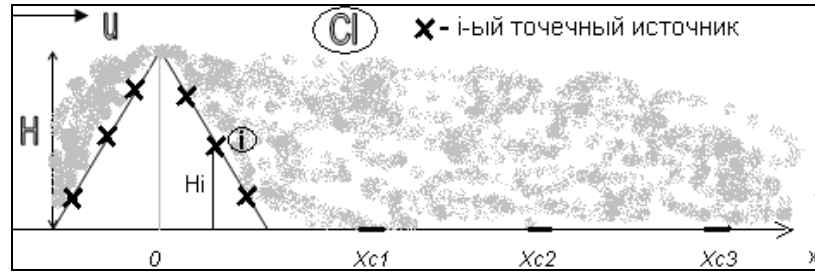


Рис. 1. Сечение отвала вертикальной плоскостью вдоль направления ветра.

Простейшей краткосрочной стационарной моделью, позволяющей количественно описать процесс распространения и осаждения пылевых частиц в зависимости от параметров источника и метеорологических условий является модель гауссовского факела [4,5]. Как неоднократно отмечалось в литературе, применительно к расчету осаждения частиц она удовлетворительно работает на незначительных удалениях от источника, что в нашем случае вполне оправдано.

Как показано в [6], если точечный источник выбрасывает в атмосферу Q (г/сек) пылевых частиц одинаковой плотности, аэродинамического диаметра и, следовательно, скорости оседания V (м/сек), то выпадение $\bar{\omega}$ (г/м^2) таких частиц на расстоянии X (м) за время T (сек) на подстилающую поверхность можно рассчитать на основе соотношения, которое для дальнейшего удобно представить в виде

$$\bar{\omega} = T \times Q \times F(H, X, U, \sigma_y, \sigma_z, V), \quad (1)$$

где H – высота выброса (м); U – скорость ветра (м/сек); σ_y, σ_z – дисперсионные коэффициенты, зависящие от класса устойчивости атмосферы и определяющие интенсивность турбулентного перемешивания в поперечном ветру направлении по горизонтали и вертикали [4]. Функция F задается выражением

$$F = \frac{V}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{H - \left(\frac{XV}{U} \right)}{\sigma_z} \right)^2 \right), \quad (2)$$

а зависимость коэффициентов σ_y, σ_z от расстояния X и класса устойчивости атмосферы можно найти в [4,5].

Представим поверхность нашего неорганизованного источник в виде совокупности из N областей, каждая из которых имеет одинаковую площадь. Заменим каждую i -ю область точечным источником с номером i , который выбрасывает в атмосферу Q_i ($i = 1, \dots, N$) пылевых частиц с долевым фракционным составом P_j ($j = 1, \dots, K$), где K – число фракций, а $\sum_{j=1}^K P_j = 1$. Тем самым выброс j -ой фракции от i -го источника составляет $Q_{ij} = Q_i \times P_j$. При этом j -я фракция обладает скоростью оседания V_j . В соответствии с (1), получим на расстоянии X_i от i -го условного точечного источника (заменяющего i -ю область) суммарное осаждение на поверхность

$$\bar{\omega} = T \times \sum_{j=1}^K (Q_i \times P_j \times F(H_i, X_i, U, \sigma_{yi}, \sigma_{zi}, V_j)) = T \times Q_i \times \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_i, V_j). \quad (3)$$

В предположении единого фракционного состава и однородности выброса со всей площади поверхности отвала получим на расстоянии X_c от точки с $X=0$ (рис. 1) суммарное выпадение Ω_{X_c} (г/м^2) от всего отвала (X_{Ci} – расстояние до точки с координатой X_c от i -го точечного источника)

$$\Omega_{X_c} = \sum_{i=1}^N \bar{\omega}_i = T \times \sum_{i=1}^N Q_i \times \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_{Ci}, V_j) = T \times Q \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K P_j \times F_{ij}(X_{Ci}, V_j). \quad (4)$$

Поскольку геометрия отвала и его разбиение на точечные источники предполагается известным, то известны все H_i и X_i . Известны определяющие метеоусловия (скорость ветра U и класс устойчивости

С1), а, следовательно, и диффузионные параметры σ_{yi}, σ_{zi} для каждого точечного источника. Суммарный выброс всего отвала Q можно ориентировочно получить на основе методики [3].

Таким образом, для полной реализации (4) необходимо задать число фракций K , дисперсный состав P_j и значения скоростей оседания V_j для каждой фракции частиц. Для первых экспериментов положим $K = 5$ и воспользуемся таблицей из [1] для скоростей осаждения V_j . Дисперсный состав будем считать неизвестным, хотя ориентировочное его значение можно оценить по литературным данным [7].

Таблица 1. Параметры удаления частиц из атмосферы на подстилающую поверхность.

Класс по размеру	Диаметр частиц, мкм	Доля фракции в выбросе P_j	Скорость осаждения на снег, $V_j S$, м/с	Скорость осаждения на почву, V_j , м/с
1. Очень мелкие	<1	P1	0.001	0.002
2. Мелкие	1-10	P2	0.007	0.013
3. Средние	10-50	P3	0.042	0.043
4. Крупные	50-100	P4	0.151	0.155
5. Очень крупные	>100	P5	0.420	0.430

Предположим, что в точках X_{c1}, X_{c2}, X_{c3} (см. рис. 1) определены суммарные (для всех фракций) значения выпадения пылевых частиц за период времени T (например, 1 час или 3600 сек), и эти значения равны $\Omega_{X_{c1}}^d, \Omega_{X_{c2}}^d, \Omega_{X_{c3}}^d$. Попытаемся определить неизвестный дисперсный состав P_j из условия

$$\sum_n (\Omega_{X_{cn}}^d - \Omega_{X_{cn}})^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для этой цели разработана вычислительная схема и компьютерная программа, позволяющая проводить циклы расчетов осаждения в заданных точках с различными комбинациями P_j . Принцип варьирования P_j позволяют производить как полный перебор с заданными шагами по P_j , так и использовать закономерности осаждения частиц различных размеров при удалении от источника. Заметим, что представление (4) позволяет после принятия постоянного числа фракций K и их постоянной скорости осаждения V_j единожды насчитать матрицу $\|F_{ij}(X_{ci}, V_j)\|$ (размерность $N \times K$) по формуле (2) и затем при варьировании фракционного состава P_j просто пересчитывать линейную форму (4), значительно ускорив тем самым процесс поиска оптимального в смысле (5) набора P_j^0 . Ниже приведены некоторые результаты численных экспериментов.

Численный эксперимент

Для проверки работоспособности модели, возьмем ориентировочные данные, имитирующие экспериментальные исследования по осаждению пыли в трех точках на расстоянии 50, 100 и 150 метров от отвала с максимальной высотой $H = 12$ м и шириной сечения 20 м (см. рис. 1). Длина отвала, т.е. его горизонтальный размер, перпендикулярный плоскости рисунка 1, составляет 100 м. Предположим, что в момент проведения эксперимента скорость ветра была 1 м/сек при классе устойчивости атмосферы D . В течение часа суммарное осаждение пыли составило $\Omega_1^d = 0.6$, $\Omega_2^d = 0.7$ и $\Omega_3^d = 0.4$ г/м². Ориентировочный суммарный выброс пыли Q со всей поверхности отвала при данной скорости ветра в соответствии с методикой [3] составляет при работе на отвале техники и ветровом сдувании может достигать 8 г/сек.

Разобьем поверхность отвала на 6 точечных источников, отвечающих за участки отвала с одинаковой площадью, и сконцентрируем в них выброс по всей 100-метровой длине отвала. В предположении равномерности выброса с единицы площади получим для каждого из 6-и источников суммарный выброс $Q_i = 1.333$ г/сек.

Начальное разбиение по дисперсному составу P_j^1 возьмем на основании литературных данных, приведенным в [5], учитывая, что выделение пыли на действующем отвале обусловлено такими процессами, как выгрузка, формирование и сдувание

Таблица 2. Начальное разбиение суммарного выброса по фракциям.

Номер фракции j , (таб. 1)	1	2	3	4	5
Начальный состав, P_j^1	0.2	0.37	0.2	0.15	0.08
Выброс $Q_{ij}^1 = Q_i P_j^1$, г/сек	0.32	0.592	0.32	0.24	0.128

Разбиение выброса каждого из 6 источников по фракционному составу фактически означает то, что каждый из этих источников превращается в 5 самостоятельно действующих, но выбрасывающих частицы только одного из пяти приведенных в табл. 1 размеров.

Пробный расчет с указанными выше метеоусловиями и параметрами выброса (см. рисунок 2) показал, что экспериментальные точки лежат достаточно далеко от расчетной кривой суммарного осаждения на подстилающую поверхность. Причем максимум выпадения лежит заметно ближе к источнику. Физический смысл процесса выпадения частиц с различной скоростью осаждения подсказывает, что направление поиска оптимального фракционного состава P_j^o в данном случае следует, скорее всего, искать путем увеличения процента мелких и средних частиц при снижении доли крупной фракции. Целенаправленный перебор возможных вариантов P_j с вычислением критерия (5) и остановкой итераций при сумме квадратов отклонения менее 3% от квадрата среднего значения экспериментальных замеров позволил получить один из вариантов “оптимального” дисперсного состава P_j^o , который приведен в табл. 3. Следует заметить, что в процессе вычислений для проверки критерия (5) потребовалось также изменение суммарного выброса источника Q в сторону увеличения. Величина Q , для которой на рисунке 3 приведен расчет с оптимальным дисперсным составом равна 13.4 г/сек.

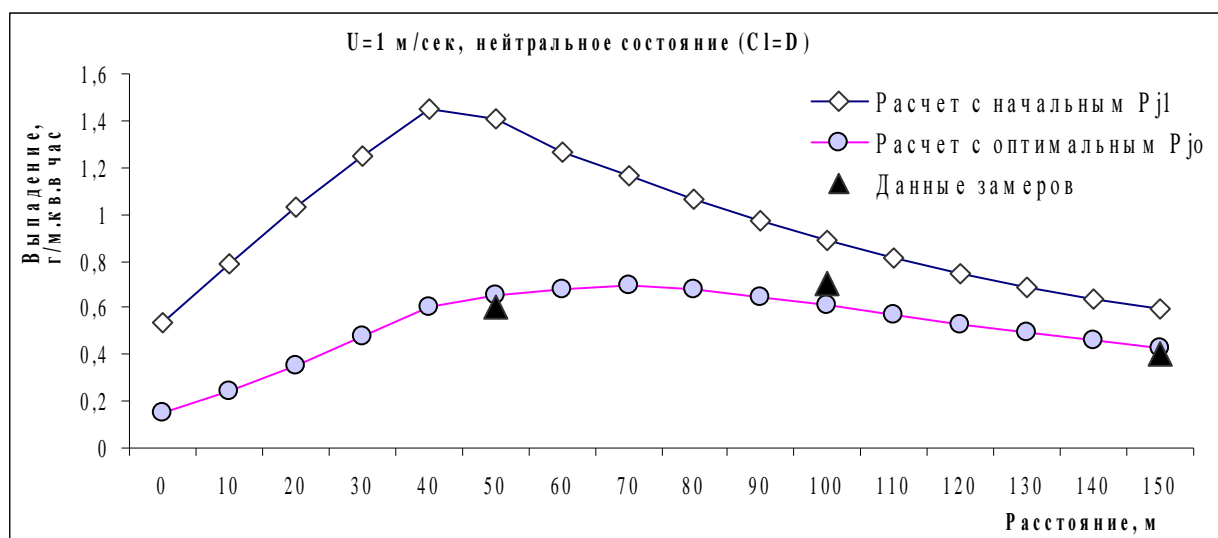


Рис. 2. Сравнение расчетов суммарного выпадения пылевых частиц от отвала для начального и оптимального в смысле критерия (5) фракционного состава выброса.

Таблица 3. Оптимальное разбиение суммарного выброса по фракциям.

Номер фракции j, (таб. 1)	1	2	3	4	5
Начальный состав, P_j^1	0.5	0.27	0.2	0.02	0.01
Выброс $Q_{ij}^o = Q_i P_j^o$, г/сек	1.34	0.724	0.536	0.054	0.027

Заключение

Исходя из приведенных численных экспериментов можно сказать, что, зная суммарное количество выпавшего пылевого осадка в нескольких подветренных точках, действительно можно подобрать такой дисперсный состав выброса, при котором расчетные данные будут отличаться от экспериментальных с допустимым для практики отклонением. Привлечение физического смысла процесса осаждения позволяет достаточно надежно выбрать направление поиска оптимального решения.

Таким образом, предлагаемая модель представляется вполне работоспособной и готовой для усвоения данных эксперимента, который планируется провести в окрестности одного из отвалов в 2011 году.

Литература

1. Быков А.А., Счастливец Е.Л., Пушкин С.Г., Климович М.Ю. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10, № 5. С. 563-573.
2. Быков А.А., Счастливец Е.Л., Пушкин С.Г. Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 4. С. 74-82.

3. Отраслевая методика расчета количества отходящих, уловленных и выбрасываемых в атмосферу вредных веществ предприятиями по добыче угля. Пермь: МНИИЭКО ТЭК, 2003. 116 с.
4. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под. ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х.-Л. Ван-Допа: Гидрометеоздат, 1985. 350 с.
5. Белов И.В., Беспалов М.С., Клочкова Л.В., Павлова Н.К, Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Сравнительный анализ некоторых математических моделей для процессов распространения загрязнений в атмосфере // Математическое моделирование. 1999. Т. 11, №7.
6. Wark K., Warner C.F. Air Pollution. Its Origin and Control. N.Y.: A Dun-Donnelley Publisher, 1976.
7. Быков А.А., Счастливец Е.Л., Пушкин С.Г., Смирнова О.В. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона // Ползуновский вестник. 2006. № 2. С. 209-217.

Ангарский регион России: водохранилища ГЭС, окружающая среда и проблемы дистанционно-картографического зондирования

А.Я. Гиенко, Б.Н. Нефедов

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» Красноярского научного центра СО РАН

Обострение многих экологических проблем современности связано с нерациональным природопользованием. Особенно это характерно для некоторых районов Сибири, в частности - для Ангарского региона, где интенсивная эксплуатация природных ресурсов (водных, лесных, минеральных) нередко приводит и приводит к противоречиям между природой и человеком. В результате сдерживаются темпы экономического развития территории, загрязняется природная среда, создаются очаги экологической напряженности.

Гидротехническое строительство на Ангаре оказало масштабное воздействие на экологическое состояние региона. За последние 50 лет существенно преобразована водная система Ангары, что привело к созданию обширных аквальных пространств и затоплению пойменных земель. В процессе строительства водохранилищ ГЭС перенесены сотни населенных пунктов. Одновременно построены новые города и предприятия-гиганты (Братский алюминиевый завод, Усть-Илимский ЦБК, химические заводы Ангарска, Усоля-Сибирского и др.), ставшие основными загрязнителями природной среды региона. В хозяйственный оборот вовлечены дополнительные природные и трудовые ресурсы, что изменило уклад жизни местного населения. Решены многие вопросы комплексного использования природных ресурсов Приангарья.

Вместе с тем возникли проблемы загрязнения Ангары и прилегающих территорий, что требует доработки мер, направленных на рационализацию природопользования в регионе. Важное место в реализации такой программы занимают геоинформационные технологии, позволяющие исследовать и контролировать изменения ландшафтов, связанные с антропогенным воздействием на природные системы.

Существующие экологические проблемы Приангарья требуют комплексного подхода к методологическим и методическим разработкам, ориентированным на анализ общего состояния и прогноз развития окружающей среды, организацию и проведение систематического мониторинга этой обширной территории. Главной целью мониторинга должно быть обоснование комплекса научно обоснованных мероприятий, направленных на сохранение имеющегося природного потенциала. Важным звеном такого мониторинга является прогнозирование развития геосистем на ближайшую и отдаленную перспективу при различных сценариях антропогенно-техногенного воздействия на среду.

Геоинформационные технологии базируются на исследовании материалов космических съемок. Природно-ресурсная информация, получаемая по каналам дистанционного зондирования Земли, существенно дополняет наши представления о системных свойствах природных комплексов: их целостности, компонентной, территориальной и временной организации, иерархичности связей. С другой стороны, учет геосистемных отношений, выражающихся в природных закономерностях, служит базой для общегеографической и тематической интерпретации дистанционных снимков.

Решение задач устойчивого развития Приангарского региона невозможно без активизации природно-ресурсных, в том числе водно-ресурсных исследований. Одним из мощных средств изучения природы, анализа свойственной ей взаимосвязей и природно-антропогенных взаимоотношений является дистанционно-картографический метод, базирующийся на концепции системного подхода к получению, обработке и использованию контактной (полевой), дистанционной (аэрокосмической) и картографической информации.

Практика применения аэрокосмических съемок для изучения природы Сибири показывает высокую эффективность комплексирования наземных, дистанционных и картографических методов. При географических исследованиях снимок обычно используется совместно с общегеографической (топографической) картой, что облегчает его пространственную ориентацию и расшифровку, поскольку карта содержит достоверную информацию об основных компонентах местности - рельефе, гидрографической сети, растительном покрове, населенных пунктах, путях сообщения и др. Изучая снимок совместно с картой, можно получить дополнительный пласт ресурсной и экологической информации о местности, в том числе выполнять ретроспективный анализ, отслеживать динамические ряды и т.д.

Дистанционно-картографический мониторинг геосистем особенно эффективен при изучении больших территорий, каким является исследуемый Ангарский регион. Значительная меридиональная протяженность территории и выраженная высотная дифференциация рельефа обуславливают широкое разнообразие природных условий и неравномерную устойчивость геосистем к антропогенно-техногенным нагрузкам и, как следствие, к необходимости учета экологических рисков.

Многие гидроэкологические явления и процессы невозможно изучать изолированно от других компонентов среды, поскольку они являются результатом взаимодействия комплекса природных и антропогенных факторов. С этим связана необходимость дальнейшего развития теоретической базы

дистанционно-картографического метода исследований, выявления комплексных (косвенных, индикационных, ландшафтных) признаков интерпретации космической информации на основе учета геосистемных отношений. Поэтому совершенствование имеющихся и разработка новых методик и технологий дистанционно-картографических исследований в широком диапазоне направлений (водно-ресурсное, гидроэкологическое и др.) и их апробация на локальном и региональном уровнях имеет большое научное и практическое значение.

Антропогенная трансформация геосистем в Приангарье приобретает масштабный характер (рис. 1) и требует более действенного регулирования природопользования с учетом экологических императивов. Таким образом, одной из главных проблем современности является нахождение баланса между эффективным природопользованием в интересах настоящего поколения и сохранением природных ресурсов в интересах будущих поколений.

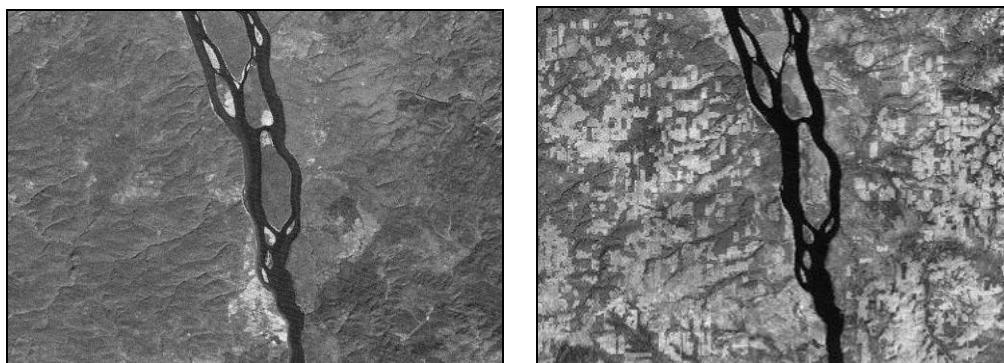


Рис. 1. Изменение экологической ситуации в районе нижнего бьефа Усть-Илимской ГЭС за последние десятилетия. На втором космическом снимке (справа) четко прослеживаются массивы разновременных вырубок леса.

Природопользование всегда связано с изъятием тех или иных компонентов из природных систем и с различными видами «побочных» негативных последствий. К последним, прежде всего, относится изменение естественного состояния природной среды. Например, водохранилища, создаваемые на реках для решения задач энергетики, водоснабжения, рекреации, судоходства, рыбного хозяйства, выполняют много полезных функций. Вместе с тем они коренным образом преобразуют сложившиеся экосистемы в зонах затопления и подтопления, изменяют водный режим, трансформируют пойменные земли в нижних бьефах, оказывают другие неблагоприятные последствия в бассейнах рек.

В результате техногенного воздействия на природу Ангарского региона изменился ход природных процессов на площади более 50 тыс. км². Здесь можно выделить 3 категории земель:

1 – аквальные пространства, где наземные долинные экосистемы (Ангары и ее притоков) заменены на водные экосистемы (водохранилища). Вследствие резкого снижения скорости водообмена и загрязнения воды стоками городов, а также гниения затопленной и плавающей древесины водноэкологическая ситуация экосистемы неудовлетворительная.

По всей вероятности, проблема загрязнения водных объектов в регионе в обозримом будущем положительно не решится. Поэтому вопрос оптимизации водопользования на преобразованном участке Ангары является актуальной научно-практической задачей и требует системного решения.

2 – береговая зона водохранилищ (сравнительно узкая полоса взаимодействия воды и суши, где образуются абразионные и аккумулятивные формы рельефа). Протяженность береговой зоны – около 12000 км, ширина до 500 м. В отличие от естественных водоемов, берега которых формировались на протяжении длительного эволюционного развития котловин, берега ангарских водохранилищ находятся в состоянии неустановившегося режима развития, когда вновь созданные искусственные водные объекты находятся в противоречии с древним ландшафтом побережий /10/. Геологические процессы на берегах водохранилищ происходят в ускоренном темпе, ход которых зависит как от конкретных инженерно-геологических условий территории, так и от размеров водоемов, их глубины и уровня режима, а также географического положения, климатических и других физико-географических факторов. Ведущим процессом формирования берегов является ветроволновое воздействие на склоны в сочетании с выветриванием, стоковым и вдольбереговым течением. Образуются различные типы берегов: абразионные, аккумулятивные и нейтральные. Первые нередко осложняются оползнями, карстом и оврагами, что представляет определенные сложности при хозяйственном использовании прибрежных территорий. Стабилизации берегов, за исключением нейтральных, не наблюдается, поэтому целесообразно продолжение исследований береговых процессов на водохранилищах с целью совершенствования защитных сооружений.

3 – зона влияния водохранилищ, примыкающая к береговой полосе. Прибрежные территории заняты преимущественно таежными лесами, в которых производились и производятся промышленные рубки, и только в южных районах доминируют лесостепные ландшафты, где развито сельскохозяйственное

производство. Население и промышленность сконцентрированы в южных районах; здесь в городах проживает около 1 млн. человек. После наполнения водохранилищ изменились климатические, гидрогеологические, ландшафтные и другие географические условия прибрежных территорий, последствия которых еще во многом не изучены. Например, в нижней части Братского водохранилища подземные воды инфильтрационного типа фиксируются от уреза воды в полосе до 5-10 км в зависимости от характера рельефа, геологического строения, уровенного режима водохранилища и других факторов. Подъем уровня подземных вод при определенных условиях вызывает затопление и подтопление земель, деградацию многолетней мерзлоты, активизацию экзогенных геологических процессов, гравитационные подвижки склонов. Нередко осложняется эксплуатация зданий, инженерных коммуникаций и транспортных сетей.

Целью оперативного экологического мониторинга этой зоны является оценка и прогнозирование динамики природно-антропогенных систем дистанционно-картографическим методом в сочетании с натурными наблюдениями на репрезентативных полигонах и профилях для решения задач сохранения среды и управления территорией. Для достижения этой цели, в частности, необходимо:

- уточнить схему ландшафтной структуры территории;
- выявить масштабы, степень и характер техногенно-антропогенной нарушенности природной среды и ее направленность;
- адаптировать дистанционные методики анализа геосистем к условиям Приангарья;
- разработать принципы и приемы картографирования текущего состояния и прогнозируемой динамики природно-антропогенной среды;
- обосновать и сформулировать предложения по рационализации природопользования в регионе, так как его ресурсный потенциал не исчерпан и при соответствующем подходе может быть умножен.

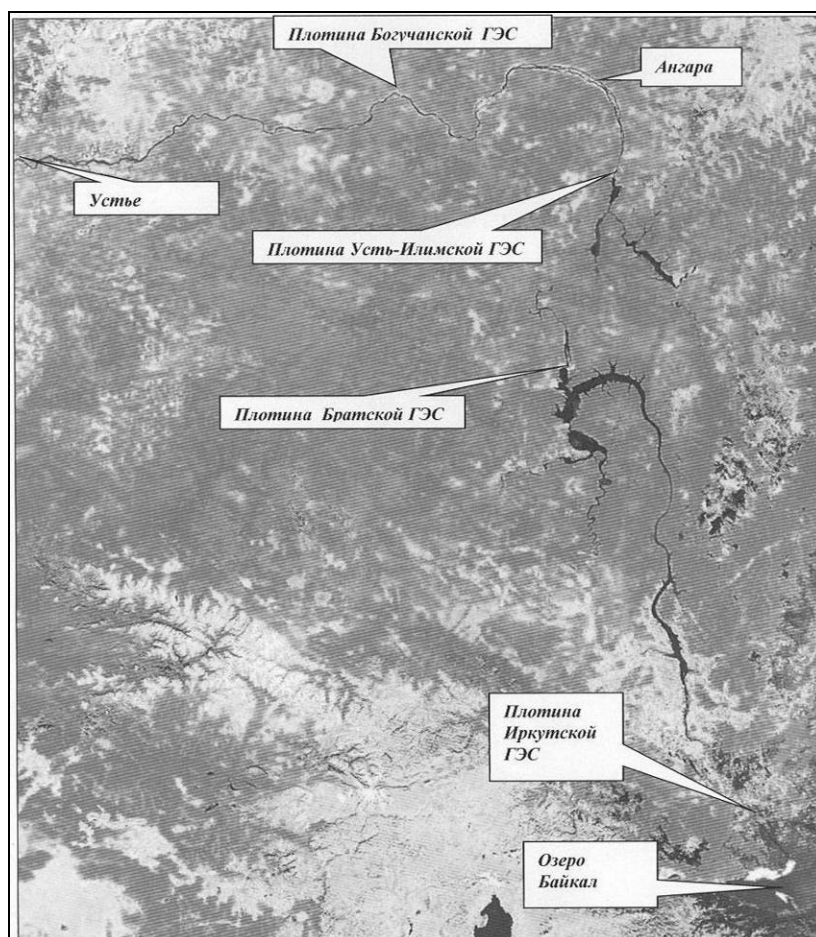


Рис. 2. Ангара и построенные на ней плотины и водохранилища ГЭС. Обзорный космический снимок, сделанный до заполнения Богучанского водохранилища.

Значительную часть Ангары – некогда мощного водного потока протяженностью 1826 км, в настоящее время занимают водохранилища Иркутской, Братской и Усть-Илимской ГЭС (рис. 2). Ангара – крупная река в Сибири, водный режим которой трансформирован на всем протяжении – от истока до устья. На Ангаре и на Нижнем Енисее в результате крупномасштабного преобразования речной сети и подпора уровня воды Байкала плотиной Иркутской ГЭС произошла существенная трансформация (перераспределение) стока. Возникла угроза нарушения естественного режима

функционирования экосистемы Енисейского залива Карского моря – приемника загрязненных вод Енисея, в который впадает Ангара. Сейчас ясно, что для восстановления качества воды в Ангаро-Енисейском бассейне до уровня допустимых значений загрязнения потребуются огромные средства. Учитывая сложное экономическое состояние современной России, в ближайшие десятилетия таких средств не предвидится и ситуация вряд ли изменится. В настоящее время вода в Ангаре характеризуется как «грязная».

Ниже приводятся краткие сведения о каскаде действующих Ангарских водохранилищ. Все они используются комплексно: для целей энергетики, водоснабжения, рыбного хозяйства, водного транспорта, рекреации. Строящееся Богучанское водохранилище рассмотрено подробнее.

Иркутское водохранилище (без оз. Байкал) построено в 1962 г., имеет полный объем 2.1 км³, полезный объем – 0.4 км³. Протяженность вдоль Ангары 55 км. Отметка нормального подпорного уровня воды (НПУ) 457 м. Подъем воды у плотины 35 м.

Братское водохранилище построено в 1967 г., имеет полный объем 162 км³, полезный объем – 48.2 км³. Общая протяженность 1020 км, в том числе вдоль Ангары 570 км. Отметка НПУ 402 м. Подъем воды у плотины 100 м. Затоплено на корню 12 млн. м³ древесины /3.

Усть-Илимское водохранилище построено в 1974 г., имеет полный объем 58.9 км³, полезный объем – 2.8 км³. Протяженность по Ангаре 340 км, по реке Илим – 310 км. Отметка НПУ 296 м. Подъем воды у плотины 94 м. Затоплено на корню 5 млн. м³ древесины (рис. 3, 4).



Рис. 3. В таком состоянии было днище Усть-Илимского водохранилища непосредственно перед заполнением. Как видно, произведена только выборочная рубка леса. Аэрофотоснимок 1973 г.



Рис. 4. Усть-Илимское водохранилище, приплотинный участок. Съемка 2009 г.

Богучанское водохранилище после наполнения будет иметь полный объем 58.2 км³, полезный объем – 2.3 км³, длину 375 км, отметку НПУ 208 м. Подъем воды у плотины 71 м. Особую обеспокоенность вызывают экологические последствия строительства Богучанского гидроузла, связанные с неудовлетворительной подготовкой ложа водохранилища. В частности, большое количество оставляемой

под затопление древесины (по нашим подсчетам 2 млн. м³, по другим данным – значительно больше) в условиях замедленного водообмена неизбежно приведет к засорению водоема, резкому снижению самоочищающей способности воды и ухудшению ее качества.

После строительства Богучанского гидроузла под водохранилищами окажется более 70% длины Ангары, суммарная их площадь составит почти 1/3 акватории Байкала (см. таблицу).

Таблица. Площадь водохранилищ на Ангаре в сравнении с площадью акватории оз. Байкал.

Водохранилище	Площадь, тыс. кв. км	% от площади Байкала
Иркутское (без озера Байкал)	0.2	0.6
Братское	5.5	17.5
Усть-Илимское	1.9	6.0
Богучанское (стр.)	2.3	7.3
Все водохранилища	9.9	31.4

Особенности возведения Богучанского гидроузла (затянувшийся более чем на четверть века период строительства, создание водохранилища на участке Ангары с высоким уровнем транзитного загрязнения воды и недостаточной подготовкой ложа, интенсивное освоение ресурсного потенциала территории без серьезной научной проработки стратегии устойчивого развития региона и др.) предопределили ряд принципиальных позиций, с которых целесообразно рассматривать проблему экологии Нижнего Приангарья.

1. При оценке экологических последствий строящегося Богучанского гидроузла за фоновое (исходное) состояние местности принята географо-экологическая и социально-экономическая ситуация, существовавшая до начала работы на объекте (семидесятые годы прошлого века).
2. К зоне влияния Богучанской ГЭС отнесена вся территория Нижнего Приангарья, а не только районы, непосредственно примыкающие к гидроузлу.
3. Социально-экологические последствия природопользования должны иметь приоритет перед экономическими результатами. Это требует более полного анализа и учета факторов, оказавших неблагоприятное воздействие на действующие водохранилища Ангаро-Енисейского бассейна с целью минимизации ущерба природе при строительстве Богучанской ГЭС. К ним относятся, прежде всего, вопросы лесосводки и лесочистки затопляемой территории, подтопления земель, заболачивания, переформирования берегов и др. [1-11].

Обобщение имеющейся информации по экологии Богучанского гидроузла позволяет сделать следующие практические предложения.

1. Целесообразно снизить высоту уровня воды водохранилища до отметки 180-185 м с целью сохранения 100-километрового проточного участка Ангары ниже плотины Усть-Илимской ГЭС для разбавления стоков Усть-Илимского ЦБК, а также части ценных для региона пойменных (в том числе старопахотных) земель
2. Целесообразно провести повторную лесосводку и лесочистку на всей территории, подлежащей затоплению, подтоплению и размыву. Это отодвинет срок пуска Богучанской ГЭС в эксплуатацию, но позволит более рационально использовать водные и лесные ресурсы.

Региональные экологические проблемы – это проблемы, решение которых зависит как от уровня знаний о природной среде, так и от учета требований рационального использования ресурсов, оптимального соотношения экономических и социальных критериев природопользования. В связи с этим отметим, что при существующей в России практике экологическая экспертиза ориентирована, в основном, на выявление оценки воздействия проектируемых объектов на окружающую природную среду. Это необходимый, но только первый шаг. Следующим шагом должен быть проект ликвидации негативных экологических последствий хозяйствования как в процессе строительства объектов, так и при их эксплуатации. Как показывает практика, в современных экономических условиях никакие штрафы за загрязнение природной среды проблему не могут решить в принципе.

Многие природно-социальные объекты, процессы и явления невозможно изучать изолированно от других компонентов среды, поскольку первые являются результатом взаимодействия природных и антропогенных факторов. С этим связана необходимость дальнейшего развития теоретической базы дистанционно-картографического метода исследований, в частности, выявления комплексных (косвенных, индикационных) признаков ландшафтной интерпретации космической информации на основе учета геосистемных отношений. Поэтому совершенствование имеющихся и разработка новых методик и технологий дистанционно-картографических и, более широко, геоинформационных исследований в большом диапазоне направлений (ландшафтное, водно-ресурсное, экологическое и др.) и их апробация на локальном и региональном уровнях имеет важное научное и практическое значение.

В заключение отметим, что в начальной стадии заполнения Богучанского водохранилища было выполнено экспедиционное обследование ложа будущего водоема. Цель экспедиционных исследований -

сбор фактического материала, характеризующего реальную географо-экологическую обстановку в зоне затопления на тестовых участках. Эти материалы будут важны, так как после заполнения водохранилища получить такую информацию будет уже невозможно.

Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Красноярского края в 2001 году». М.: НИИ-Природа, РЭФИА, 2003-224 с.
2. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Иркутской области в 2000 году». Иркутск, 2001- 384 с.
3. Корпачев В.П., Малинин Л.И., Худоногов В.Н., Рябоконт Ю.И., Чебых М.М. Загрязнение и засорение древесной массой рек и водохранилищ Ангаро-Енисейского региона и проблемы их очистки// Экологическое состояние и природоохранные проблемы Красноярского края/ Материалы подготовительной конференции ко Всероссийскому съезду по охране природы. 30 января-1 февраля 1995 года. Красноярск, 1995. С. 86-88.
4. Нижнее Приангарье: географические условия развития. (Материалы к государственной программе освоения Нижнего Приангарья). Вып. 1. Иркутск, 1991. 154 с.
5. Российско-Канадский проект сотрудничества по принятию решений в области охраны окружающей среды». Состояние Ангары/ Материалы 1-го научно-методического семинара «Состояние р. Ангары и пути управления использованием ресурсов и их качеством». М., 2000. 200 с.
6. Российско-Канадский проект сотрудничества по принятию решений в области охраны окружающей среды». Управление водопользованием. М., 1999. 240 с.
7. Российско-Канадский проект сотрудничества по принятию решений в области охраны окружающей среды». Проблемы комплексного использования водных ресурсов ангарских водохранилищ. М., 2000. 118 с.
8. Российско-Канадский проект сотрудничества по принятию решений в области охраны окружающей среды». Предотвращение загрязнения в бассейне Ангары. М., 2000. 105 с.
9. Среднее Приангарье (географическое исследование хозяйственного освоения таежной территории). Иркутск, 1975. 224 с.
10. Финаров Д.П. Динамика берегов и котловин водохранилищ гидроэлектростанций СССР. «Энергия», Ленингр. Отделение, 1974. 244 с.
11. Формирование берегов Ангаро-Енисейских водохранилищ. Н.: «Наука», Сиб. отделение, 1988. 112 с.

Исследование природно-техногенных систем методом компьютерного моделирования физико-химических процессов

Н.В. Головных¹, В.А. Бычинский¹, А.В. Мухетдинова¹, И.И. Шепелев², К.В. Чудненко¹

¹ Институт Геохимии им. А.П.Виноградова Сибирского отделения РАН, Иркутск

² ООО «ЭКО-Инжиниринг», Ачинск

Методы и средства компьютерного моделирования

Прогнозирование экологических последствий промышленных выбросов и сбросов невозможно без компьютеризированного системного анализа сложных интегрированных систем «природные ресурсы – технологические циклы – окружающая среда». Нами осуществлен инновационный подход к проблеме компьютерного моделирования физико-химических процессов, связанных с образованием, переработкой и рециклингом производственных продуктов и отходов. Для этой цели использован прошедший многолетнюю проверку при решении целого ряда теоретических и прикладных задач программный комплекс (ПК) «Селектор», разработанный в лаборатории физико-химического моделирования Института геохимии СО РАН имени А.П. Виноградова [1].

Благодаря успехам в развитии теории физико-химического моделирования - ФХМ созданы современные компьютерные алгоритмы для расчета сложных равновесий и динамики физико-химических систем [Ватолин, 1994; Карпов, 1997; Shvarov, 2000]. Метод минимизации свободной энергии - МСЭ [Карпов, 1981; Чудненко, 2007] дает возможность определить равновесное соотношение фаз с учетом кинетических особенностей процессов и метастабильных состояний компонентов, что в отличие от метода расчета по константам равновесия субъективно выбранных и ранжированных химических реакций МКР - устраняет неопределенность пути протекания физико-химических превращений [1, 2].

Профессором И.К. Карповым сформулирован основной математический принцип поиска и расчета минимума свободной энергии физико-химической системы, отвечающий равновесному составу мультисистемы, согласно которому в точке $\min G(x)$ разница между прямым и двойственным решением стремится к нулю и достигается материальный и энергетический баланс всех компонентов. Это позволяет определить фазовый состав системы, рассчитать мольные количества компонентов и их распределение по фазам. При поиске и расчете $\min G(x)$ разработан алгоритм внутренних точек (МВТ), основанный на системе итерационных уравнений, построенных по взвешенному методу наименьших квадратов, причем в качестве весовых аргументов используются мольные количества компонентов и величины их отклонений от верхних и нижних ограничений [2].

Чтобы осуществить физико-химический процесс, необходимо перевести термодинамическую систему из одного равновесия в другое, для этого вводится дополнительная энергия, как это, например, делается при электролизе [3]. При этом свободную энергию системы следует минимизировать в следующем векторном виде:

$$G(x) = g \cdot x / (RT) + x \ln(x / X_\alpha) + x \ln y + x(\Delta G_A), \quad (1)$$

где g – вектор изобарно-изотермических потенциалов компонентов; x - вектор мольных количеств компонентов в системе; X_α – общее число молей компонентов в фазе α ; y – вектор коэффициентов активности компонентов; ΔG_A – энергия, затрачиваемая на повышение активности компонентов, необходима для совершения химической работы

Минимизация свободной энергии с помощью шести термодинамических потенциалов (потенциала Гиббса, потенциала Гельмгольца, энтальпии, внутренней энергии, энтропии со знаком минус для изотермического и изоэнергетического режимов) дает возможность благодаря жесткому балансу между свободной и связанной энергией легко переходить от одного к другому потенциалу в различных физико-химических задачах. Если при моделировании простых гомогенных систем наиболее эффективен метод, основанный на расчете максимума энтропии [4], то в геохимических исследованиях, связанных с изучением сложных гетерогенных систем, предпочтение отдается минимизации потенциала Гиббса.

При решении физико-химических задач методом МСЭ используется систематизированный пакет входной информации, обеспечивающий быструю сборку, запуск, отладку и верификацию компьютерных моделей. В такой пакет входят: а) базы данных термодинамических свойств индивидуальных веществ и отдельных фаз, б) массивы мольных количеств исходных компонентов расходуемых сырьевых и технологических материалов, в) параметры технологических видов и квантов энергии, г) цифровые схемы и параметры взаимодействия сопряженных стадий процессов.

Большинство параметров точности операторов вычислительных процедур стандартизировано (имеется режим по умолчанию), однако, при необходимости их можно корректировать - в случае экспериментального характера задачи. Универсальность и одновременно гибкость системы управления

при выполнении модельного счета позволяет пользователю осуществить точную привязку модели к конкретному процессу.

ПК «Селектор» снабжен системой встроенных баз термодинамических данных и модулем формирования моделей различной сложности и архитектуры. Его алгоритм позволяет производить расчеты химических равновесий в изобарно-изотермических, изохорических и адиабатических условиях в мультисистемах, где могут присутствовать водные растворы электролитов, газовые смеси, жидкие и твердые углеводороды, минералы в виде твердых растворов и однокомпонентных фаз, расплавы и плазма. Расчет сложных мультисистем может включать до 1000 и более индивидуальных компонентов. Обеспечение баз термодинамических данных составляет до 15000 индивидуальных химических соединений, веществ и минералов. Число выполняемых итераций при расчете глобального минимума от 100 (нормальный режим) до 300 (режим «оврага»).

В рамках технических возможностей использование компьютерных моделей нами распространено на природные и техногенные системы.

На основании равновесий, рассчитанных по координате изменения заданного параметра, анализируются соотношения компонентов и динамика фаз, строится график фазовых изменений от степени протекания процесса. Неравновесные процессы и отдельные стадии процесса моделируются как подсистемы временного равновесия фаз, с общим термодинамическим потенциалом, его выбор определяется условиями существования систем. Данная методика универсализирована, и адаптирована к разным превращениям вещества и энергии. С учетом поправок на термодинамические свойства и активность компонентов, кинетики химических превращений данный метод моделирования применим в широком интервале энергии и скорости их взаимодействия, температуры и давления. Для различных отраслей знаний и дисциплин фундаментального и прикладного характера разработан ряд стандартизированных моделей. Подготовлены к моделированию систематизированные группы физико-химических процессов. Наряду с научными задачами значительное внимание уделяется использованию компьютерных моделей в технических системах мониторинга и управления.

1. Моделирование процессов при вводе в систему энергии. Ввод дополнительного запаса энергии в систему производится с помощью шкалы регулирования термодинамической величины - активности компонентов. Непосредственно порядок моделирования физико-химических процессов при вводе в систему энергии предусматривает включение – в матрицу массивов исходных данных отдельных мультисистем – заданных и расчетных параметров подвижных фаз и компонентов, отвечающих их наиболее реакционно-способному состоянию, вызванному энергетической активацией и совершением последующей химической работы.

Чтобы поддерживать рабочий цикл процесса, и обеспечивать непрерывную химическую работу, совершаемую системой, производится синхронизация поступления исходного вещества и ввода энергии. При этом термодинамические потенциалы системы стабилизируются на определенном уровне. Отлаженный процесс характеризуется минимальным изменением энтропии ($\Delta S \rightarrow \min$), в отличие от стихийно затухающего процесса, при котором энтропия стремится к максимуму ($S \rightarrow \max$).

2. Сложные динамические системы (мегасистемы). Моделирование сложных динамических систем – мегасистем позволяет исследовать реальные процессы в пространственно-эволюционном развитии. Динамика моделируемого процесса реализуется благодаря тому, что отдельные сопряженные подсистемы при переработке сырья обмениваются потоками вещества и энергии, оставаясь в состоянии метастабильных или динамических равновесий (смены равновесий).

Модель мегасистемы формируется как совокупность взаимодействующих термодинамических подсистем – резервуаров. Резервуар соответствует реакционной зоне, либо сопряженной стадии процесса. Его структура характеризуется мультисистемой - матрицей зависимых компонентов - индивидуальных химических соединений и фаз. Резервуары, отличаясь составом и температурой, стабильно существуют в материально-энергетическом пространстве в период протекания процесса. Между резервуарами и внешней средой осуществляется определенный обмен, поддерживается материальный и энергетический баланс. Массоперенос осуществляется в виде потоков подвижных фаз с различной скоростью переноса. Внутри резервуаров, что особенно характерно для сложных гетерогенных систем, возможно образование и поглощение фаз и компонентов, вызванных процессами смешения, охлаждения, нагревания, абсорбции. В каждую единицу времени (цикл) достигаются равновесия во всех резервуарах, и затем – перемещение вещества с потоками, согласно коэффициентам переноса.

3. Особенности моделирования технологических процессов. При моделировании технологических процессов (рис. 1) выделяются базовые физико-химические объекты, функционирующие как единые системы, взаимодействующие с окружающей средой [5].

Для достижения оптимального баланса компонентов имитируются стационарные процессы, в которых учитывается вклад и динамика протекания сопряженных стадий, варьируются условия массо- и энергообмена. Разработка модели предусматривает предварительный анализ сырья, материалов и отходов, на основании чего готовятся компьютеризированные базы составов исходных веществ и компонентов. Постановочная часть включает подготовку программных установок, формирование массивов входных физико-химических данных и внутренних сценариев развития процессов.

Учитываются характеристики основных и вспомогательных производств и переделов, технологические и физико-химические параметры процессов и компонентов, условия ввода в систему энергии, и ее преобразования.



Рис. 1. Возможности применения ПК «Селектор» в технологических процессах.

Компьютерная модель имеет структурное и функциональное описание. Для представления динамических моделей (мегасистем) используются блок-схемы, которые отображают особенности процессов и корректно представляют их внутренний сценарий развития. Количественный учет ΔG_E в уравнении (1) при минимизации интегральной функции $G(x)$ производится, исходя из того, что при загрузке сырья в реактор происходит его активация, исходные компоненты приобретают максимальную активность и вступают в химическое взаимодействие. Часть потенциальной энергии затрачивается на совершение работы, свободная энергия рабочего цикла резко уменьшается. Под действием кинетических сил, вызванных градиентами температуры, давления, осмоса, электромагнитного поля полученные продукты перемещаются в смежные резервуары, где завершается их преобразование в вещества, обладающие минимальной активностью и реакционной способностью – с наименьшим запасом свободной энергии. На завершающем этапе осуществляется вывод из реактора полученных продуктов и отходов, в окружающую среду поступает техногенное вещество и остаточная энергия.

Системный анализ технологических процессов (на примере получения алюминия)

Получение черного алюминия электролитическим способом представляет собой сложный технологический цикл [6], который может быть рассмотрен с помощью моделей отдельных процессов и подсистем. При анализе процессов получения алюминия электролитическим способом важнейшее значение имеет состав криолит-глиноземных расплавов и их корректировка в процессе электролиза.

1. Статическая модель криолит-глиноземного расплава. В основу компьютерной модели расплавленных компонентов положен физико-химический процесс растворения глинозема в расплаве криолита и других фтористых солей. Структура компьютерной модели включает массивы исходных данных; результаты расчетов изменения содержания фаз и структурных соединений в зависимости от температуры в интервале $t = 500 \dots 1100$ °С и КО от 1.0 до 3.5. Коэффициенты фугитивности и мольные объемы газов рассчитывались по трехпараметрическому уравнению состояния Ли-Кеслера с использованием критических параметров газов [7]. Термодинамические свойства отдельных веществ взяты из баз данных ПК «Селектор», определенная их часть подготовлена на основании литературных данных [8].

Образование жидкой фазы при нагревании шихтовых материалов отмечается при температурах выше 680–730°С. Фаза расплава представлена гомогенной смесью криолита, хиолита, фторидов натрия, алюминия, кальция, глиноземом. Расплав электролита характеризуется технологическим модулем или криолитовым отношением (КО), задаваемым путем изменения мольных соотношений NaF/AlF_3 . Можно выделить при 930-970 °С две области равновесных составов электролита: первая – с низким модулем ($\text{КО} \leq 2.2$), где растворителем является преимущественно хиолит $\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$; и вторая – с более высоким модулем ($\text{КО} > 2.2$), в которой растворитель представлен криолитом Na_3AlF_6 с примесью хиолита. В жидком состоянии также возможно существование ряда соединений: NaAlF_4 , Na_2AlF_5 , AlF_3 , SiO_2 , Na_2SiO_3 , Na_2S , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 .

Растворимость глинозема в расплавах фтористых солей определяется равновесным соотношением в системе $Al_2O_3(ж)$ и твердыми фазами, содержащими глинозем. При $KO > 2.2$ и $t \geq 930$ °C концентрация $Al_2O_3(ж)$ может достигать 19% масс.

Основу твердых фаз, находящихся в равновесии с расплавом в области KO от 1.7 до 3.5, составляет криолит и глинозем ($\alpha-Al_2O_3$ и $\gamma-Al_2O_3$), при $KO < 1.7$ – глинозем. В качестве примесей в состав твердых фаз могут входить алюминаты, алюмосиликаты, силикаты, сульфиды, сульфаты, карбонаты, карбиды, твердый углерод.

Газовая фаза – близкая к равновесию смесь газов, выделяющихся из расплава. В моделях расплава с $KO \leq 2.0$ установлен высокий выход газовой фазы. Основные компоненты газовой фазы – $NaAlF_4$ и AlF_2O , содержание других незначительно. При повышении температуры эмиссия фтора из низкомолекулярного расплава увеличивается, в интервале от 900 °C до 1000 °C она возрастает с 8 до 15%. Образование газовой фазы в моделях расплава с $KO \geq 2.2$ отличается меньшими масштабами, потери фтора при 1000 °C не превышают 1.2% (0.5% при $KO = 2.55$).

2. Балансовая динамическая модель электролиза. В условиях стабильного режима электролиз рассматривается как динамически равновесный процесс. Его технологический баланс поддерживается за счет того, что сопряженные резервуары (газоочистка – анод – электролит – катод – подина электролизера) находятся в состоянии метастабильного временного равновесия и обмениваются между собой и внешней средой потоками вещества и энергии.

Данный процесс сопровождается фазовыми превращениями компонентов. Так, основные структурные соединения расплава - $Na_3AlF_6(ж)$, $Na_5Al_3F_{14}(ж)$ - переходят в кристаллическое состояние, а также диссоциируют на ионы натрия Na^+ и алюмофторидов AlF_6^{3-} , AlF_4^- . Соединение $NaAlOF_2(ж)$ и другие оксифториды, образующиеся при взаимодействии глинозема с криолитом, частично распадаются на ионы Na^+ и $AlOF_2^-$. Повышенная летучесть фторидов при нагревании сырьевых материалов вызывает выделение из расплава ряда газообразных компонентов ($NaAlF_4$, AlF_2O).

Поступающая в систему электрическая энергия повышает запас ее внутренней энергии, что способствует увеличению термодинамической активности компонентов, прежде всего, ионов AlF_4^- , AlF_6^{3-} , $AlOF_2^-$ в криолит-глиноземном расплаве.

Ионы, участвуя в процессе электрохимического разложения растворенного глинозема и затрачивая энергию на выделение жидкого алюминия $Al(ж)$ на катоде, снижают свою термодинамическую активность, что приводит к изменению важной технологической характеристики – электрохимического потенциала (потенциала Нернста). Полный цикл работы электрохимической системы характеризуется уменьшением ее свободной энергии ΔG (Дж), количество которой равноценно изменению электрохимического потенциала $E(B): -\Delta G = nFE(2)$, где n – число зарядов электричества; F – константа Фарадея (Дж/В). В соответствии с этим величину энергии ΔG_A в уравнении (1) можно регулировать в определенных пределах. Путем расчета потенциала Нернста контролируется рабочее напряжение процесса электролиза.

В результате разрядки ионов, окисления угольного анода и других химических реакций, сопровождающих процесс электролиза, наряду с получением новых конденсированных фаз происходит образование значительного количества газообразных соединений (CO , CO_2 , CF_4 , HF). Анализ показывает, что компоненты расплавов в условиях электролиза подвергаются глубоким физико-химическим преобразованиям. Согласно моделированию: 62.1% алюминия находится в ионизированном состоянии (AlF_4^- , $AlOF_2^-$, AlF_6^{3-}); степень испарения расплава 1.82% ($NaAlF_4$, $OAlF_2$); при $E = 1.44$ В начинает выделяться жидкий алюминий (1.32% от массы системы).

Результаты верификации статической модели криолит-глиноземного расплава и динамической модели электролиза хорошо согласуются с теоретическими положениями, известными в электрометаллургии, и адекватны производственно-статистическим данным. Разработанные модели были использованы при выполнении балансовых инженерно-технологических обследований процесса электролиза [9].

3. Образование отходов газоочистки. В моделируемых газах электролиза установлены: $NaAlF_4$, $AlOF_2$, HF , AlF_3 , NaF , SiF_4 . Преобладающим фторсодержащим компонентом является тетрафторалюминат натрия $NaAlF_4$, содержание которого в производстве не контролируется. Соотношение отдельных соединений определяется величиной KO , а также температурами зон газоочистки.

Снижение температуры отходящих газов по мере выноса соединений фтора в системы газоудаления сопровождается превращениями. Конденсированными продуктами служат высокодисперсные натриево-алюминиевые фториды и глинозем. В газовой фазе остается фтористый водород, который, являясь продуктом разложения и гидролиза фторидов, поступает в составе охлажденных газов в систему очистки газов. Снижение криолитового отношения расплава $KO < 2$ приводит к резкому увеличению фторсодержащих выбросов и ухудшению растворимости глинозема в расплаве.

Присутствие частиц размером менее 30 мкм в составе газопылевых выбросов нельзя объяснить только механическим уносом при загрузке сырьевых материалов. Образование высокодисперсных отходов достигает 40 кг при выпуске 1 т Al, что согласно результатам физико-химического моделирования есть следствие конденсации компонентов газовой фазы в системах газоочистки. Очевидно, избежать полностью образования высокодисперсных отходов в процессе электролиза невозможно, поэтому требуется улавливание, технологическая переработка и рециклинг указанных отходов.

Выводы

Таким образом, методология компьютерного физико-химического моделирования технологических процессов основана на алгоритме минимизации свободной энергии термодинамической системы. В ходе моделирования наряду с равновесными условиями учитывается метастабильность фаз и компонентов. Сложные динамически неравновесные процессы моделируются с помощью объединения отдельных подсистем в мегасистему, в которой сопряженные резервуары (зоны) связаны потоками подвижных фаз, что позволяет имитировать различные варианты превращений и перемещений вещества и энергии. При вводе в систему дополнительной энергии в матрице исходных данных компьютерной модели предусматриваются наиболее реакционно-способные фазы и активные компоненты, что поддерживает в непрерывном состоянии технологический цикл процесса. Разработаны компьютерные модели электрометаллургических процессов, что позволяет решать вопросы промышленной экологии в производстве алюминия.

Литература

1. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A. Modeling chemical mass-transfer in geochemical processes: Thermodynamic relations, conditions of equilibria and numerical algorithms // *American Journal of Sciences*. 1997. Vol. 297. P. 767-806.
2. Чудненко К.В. Теория и программное обеспечение метода минимизации термодинамических потенциалов для решения геохимических задач. Автореферат дис. ... доктора геолого-минералогических наук. Иркутск: ИрГТУ, 2007. 54 с.
3. Делимарский Ю.К. Электролиз. Теория и практика. Киев: Техніка, 1982. 163 с.
4. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
5. Чудненко К.В., Головных Н.В. Использование метода физико-химического моделирования при оптимизации техногенных систем и технологических процессов. Экологические проблемы Северных территорий и пути их решения. Материалы III-ей Всероссийской научной конференции с международным участием. Апатиты: Издательство Кольского научного центра РАН, 2010 г. С 31-36.
6. Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Кулагин Н.М. и др. Металлургия алюминия. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 438 с.
7. Lee B.I., Kesler M.G. Generalized Thermodynamic Correlation Based on Three Parameter Corresponding // *American Institute of Chemical Journal*. 1975. Vol. 21. P. 510-527.
8. Micov M., Nagy L.T., Tunega D., Liška M., Perichta P. The structure and energetics of cryolite melts // *Theoretica Chimica Acta*. 1998. Vol. 99, N 6. P. 378-383.
9. Golovnykh N.V., Dorofeyev V.V., Bychinsky V.A., Polonsky S.B. A concept of technical measures aimed at improvement of fluorine balance during aluminium reduction // 15-th Intern. Symp. of IKSIBA "Aluminium Industry within World Economy: Problems and Trend of Development". S.Petersburg: JSC "VAMI", 2004. Vol. 31, N 35. P. 236-240.

Среднемасштабные экспериментальные исследования распространения полевого пожара и его воздействие на деревянные конструкции и слой торфа

А.М. Гришин, А.И. Фильков, Е.Л. Лобода, В.В. Рейно, А.В. Козлов, В.Т. Кузнецов, С.М. Андреюк, А.И. Иванов, Н.Д. Столярчук

Томский государственный университет

Эксперименты проводились на территории Базового экспериментального комплекса (БЭК) ИОА СО РАН [1] с координатами: № 56°28'860(859) Е 85°06'029(030) [1]. Растительность на площадке представляла собой бурьянистое луговое разнотравно-злаково-бодяковое сообщество, расположенное предположительно на месте старой залежи. Флористический состав на полигоне – обедненный со значительным участием рудеральных и антропофильных видов.

В качестве экспериментальной площадки выбиралась полоса длиной 50 м и шириной 10 м. На полосе размещались деревянные щиты высотой 1 м из досок (ель), которые имели размеры: 1000 мм×100 мм×15 мм, 1000 мм×100 мм×20 мм, 1000 мм×100 мм×25 мм и 1000 мм×50 мм×25 мм. Доски шириной 100 мм сбивались в сплошной щит, а доски 1000 мм×50 мм×25 мм сбивались с промежутками 50 мм, как забор из штакетника (рис. 1), так же был установлен брус 700 мм×200 мм×200 мм из сосны с естественным влагосодержанием (36.7 %), которого он достиг за 1 год хранения на открытом воздухе.



Рис. 1. Вид экспериментальной площадки с установленными деревянными щитами.

В конце экспериментальной полосы делались углубления, в которые помещались образцы вершинного и низинного типа торфа на одном уровне с поверхностью почвы (рис. 2).



Рис. 2. Вид уложенных образцов торфа на экспериментальной площадке: а – низинный тип торфа, б – вершинный тип торфа.

Ботанический анализ торфяных образцов из ряма и низинного болота.

Тип торфа	Глубина залегания образца, см	Латинское название вида	Русское название вида	Содержание, %
сфагновый верховой	0-10	<i>Sphagnum fuscum</i>	Сфагнум бурый	90
		<i>Sphagnum magellanicum</i>	Сфагнум магелланский	5
		<i>Sphagnum angustifolium</i>	Сфагнум узколистный	+
		Shrubs	Кустарнички	5
		<i>Oxycoccus microcarpus</i>	Клюква мелкоплодная	+
		<i>Chamaedaphne calyculata</i>	Хамедафне обыкновенная (кассандра или болотный мирт)	+
	10-20	<i>Pinus sylvestris</i>	Сосна обыкновенная	+
		<i>Sphagnum fuscum</i>	Сфагнум бурый	15
		<i>Sphagnum magellanicum</i>	Сфагнум магелланский	85
		Shrubs	Кустарнички	+
		<i>Oxycoccus microcarpus</i>	Клюква мелкоплодная	+
		<i>Chamaedaphne calyculata</i>	Хамедафне обыкновенная	+
<i>Ledum palustre</i>		Багульник болотный	+	
вахтово-осоково-гипновый низинный торф	20-40	<i>Eriophorum vaginatum</i>	Пушица влагалищная	+
		Bryales:	Гипновые мхи:	50
		<i>Drepanocladus aduncus</i>	Дрепанокладус крючковидный	45
		<i>Drepanocladus sendtneri</i>	Дрепанокладус Зендтнера	5
		<i>Bryum sp.</i>	Бриум	+
		<i>Carex sp.</i>	Осока	10
		<i>Carex diandra</i>	Осока двухтычинковая	15
		<i>Carex juncella</i>	Осока ситничек	+
		<i>Carex lasiocarpa</i>	Осока волосистоплодная	+
		<i>Menyanthes trifoliata</i>	Вахта трехлистная	25
		<i>Equisetum fluviatile</i>	Хвощ топяной	+
<i>Betula pubescens</i>	Береза пушистая	+		

Примечание: “+” – обилие вида меньше 5%, “sp.” – определение точной видовой принадлежности невозможно.

В качестве образцов, использовали торф, собранный на двух типах болот в районе г. Томска. На верховом болоте (в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе или ряме) были отобраны образцы двух близких по физико-химическим свойствам видов торфа – фускум-торфа и магелланикум-торфа. Образцы вырезались из верхнего слоя болота вместе с чесом и представляли собой параллелепипеды размером 300 мм×200 мм×200 мм. Их можно объединить в один вид торфа – сфагновый верховой. На низинном болоте был отобран вахтово-осоково-гипновый торф аналогичного размера на глубине 0.2–0.4 м. Ботанический состав образцов торфа приведен в таблице.

Все образцы древесины и торфа предварительно высушивались в сушильном шкафу ШСП 0.5-200 до влагосодержания ниже критического. Влагосодержание древесины составило 4.7 %, чеса – 11.2 %, и торфа – 12.6 %. Для измерения зависимости теплового потока от пламени на высоте 50 см, 70 см и 90 см от поверхности земли на внешней поверхности забора, расположенной со стороны фронта пожара, монтировался медный диск диаметром 30 мм и толщиной 5 мм. С задней стороны диска была зачеканена термопара типа ХА.

Температура воздуха, относительная влажность и атмосферное давление контролировались при помощи поста для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов ИОА СО РАН [2]. Температура воздуха T варьировалась в пределах 275–278 К. Относительная влажность воздуха ϕ равна 39–52 %. Атмосферное давление P_e – 751–759 мм рт. ст. Скорость ветра изменялась в диапазоне 1–6 м/с, температура почвы составила – 275 К, влагосодержание – 43%. Влагосодержание РГМ определялось при помощи анализатора влажности AND MX-50 с точностью 0.01%. Влагосодержание доминирующих на экспериментальной площадке растений W составило: Пырей ползучий – 10.6%; Василек скобеобразный (*Centaurea scabiosifolia*) – 11.3%. Мышиный горошек (*Vicia sativa*) – 9.1%; Ежа сборная (*Dactylis Glomerata*) – 10.8%. Запас СГМ на экспериментальной площадке изменялся в пределах 0.172–0.263 кг/м². Время t при проведении экспериментов контролировалось при помощи секундомера Агат 010 с точностью 0.2 с. Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали $\delta W/W \cdot 100\% \leq 3.3\%$, $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1.2\%$, $\delta P_e/P_e \cdot 100\% \leq 6.0\%$, $\delta T/T \cdot 100\% \leq 5.3\%$, $\delta \phi/\phi \cdot 100\% \leq 2.5\%$, $\delta t/t \cdot 100\% \leq 4.3\%$.



Рис. 3. Зажигание экспериментальной площадки.

Зажигание производилось равномерно по всей ширине площадки (рис. 3).

Распространение фронта пожара и его структура в видимой области контролировались с помощью видеокамеры Sony DCR-DVD505E, в инфракрасной области – помощью тепловизоров JADE J530SB (с частотой съемки 50 кадров в секунду) и Inframetrics-760. Тепловизор JADE J530SB использовался с дисперсионным фильтром, спектральный интервал которого составлял 2.5-2.7 мкм. Тепловизор Inframetrics-760 имел рабочий диапазон длин волн от 3 до 5 мкм. Для калибровки показаний тепловизоров дополнительно проводились температурные измерения при помощи гребенок термпар ХА (хромель-алюмель), расположенных в продольном и вертикальном направлениях относительно выбранной полосы исследований. Термопары крепились на вертикальных стойках с шагом 0,3 м и располагались на удалении 0.2 м от стоек по горизонтали в направлении, параллельном фронту пожара. Тепловизор JADE J530SB и видеокамера располагались на автовышке на высоте 20 м над поверхностью земли.

На рис. 4 показано воздействие фронта степного пожара на деревянные щиты.



Рис. 4. Воздействие фронта степного пожара на деревянные щиты.



Рис. 5. Результаты воздействия степного пожара на деревянные щиты.

В результате эксперимента было обнаружено (рис. 5), что наименьшие повреждения получил щит из штакетника (доски 1000 мм×50 мм×25 мм сколоченные с промежутками 50 мм).

Можно предположить, что воспламенения щита из штакетника не произошло в связи с тем, что фронт пожара свободно преодолевал щит и продолжал свое распространение дальше. Тем самым щит подвергался воздействию пламени, конвективных потоков и излучения значительно меньшее время (около 50 с). Щиты из досок шириной 100 мм подвергались воздействию высоких температур значительно более длительное время (около 95 с), в результате чего происходило их воспламенение. Следует отметить, что выбранный диапазон толщины досок не влиял на воспламенение щитов.

Для определения температуры поверхности деревянных щитов использовался метод аналогичный используемому в [1, 3-4]: в деревянный щит заделывалась термопара, показания которой являлись реперными для определения эффективного коэффициента излучения поверхности дерева в рабочем диапазоне длин волн тепловизора с учетом поглощения излучения продуктами пиролиза и горения РГМ. Для диапазона длин волн 2.5–2.7 мкм значения эффективного коэффициента излучения составили: $\epsilon_{\text{эф}} = 0.68$. На рис. 6 приведена термограмма щита из штакетника.

Из рисунка видно, что температура поверхности штакетника достигает значений максимальных значений 826–870 К в выделенных областях 1–3, что согласуется с работой [5]. На рис. 7 приведена термограмма щита из досок толщиной 25 мм непосредственно перед воспламенением забора.

Видно, что температура поверхности (области 1-4 на рис. 7) в зоне последующего воспламенения достигает 895–937 К, что превышает примерно на 60 градусов температуру поверхности штакетника (области 1–3 на рис. 6) и является причиной воспламенения. Можно предположить, что в данном случае на рост температуры поверхности оказывает влияние сплошность щита и соответственно рост времени на его нагрев и воспламенение фронтом пожара.

Максимальная плотность теплового потока, действовавшего на деревянный щит, составляла: на высоте 50 см от поверхности земли $q_{\text{max}} = 3641 \text{ Вт/м}^2$, на высоте 70 см $q_{\text{max}} = 8360 \text{ Вт/м}^2$. Это связано с ботанической структурой слоя РГМ, при которой распределение биомассы по высоте не равномерно и на высоте 50-70 см от поверхности почвы находится максимальный объем горючих материалов [3].

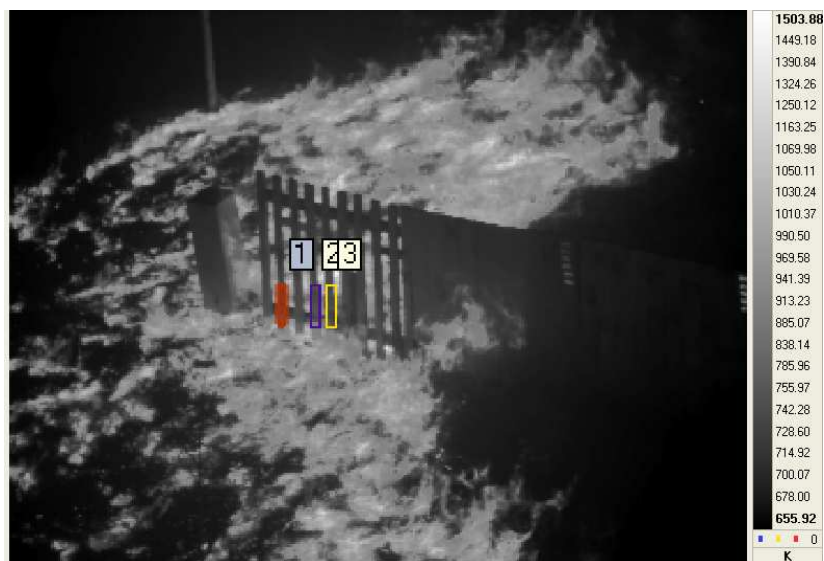


Рис. 6. Термограмма щита из штакетника.

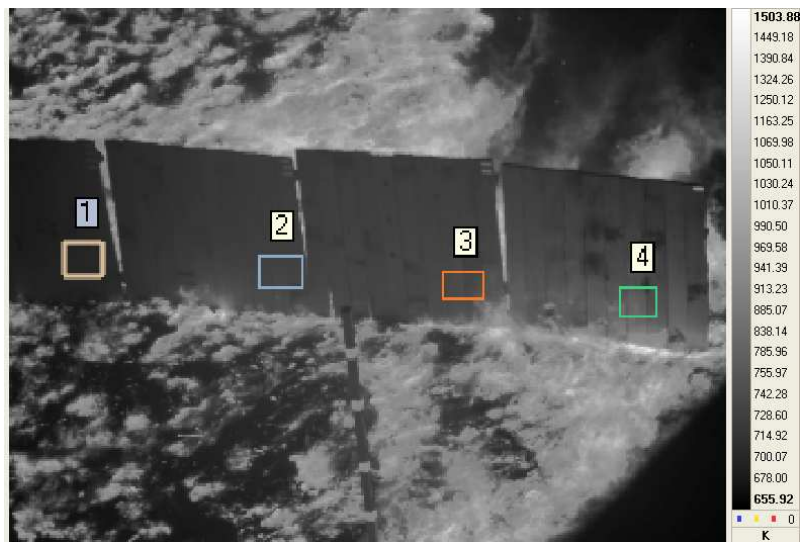


Рис. 7. Термограмма забора из доски толщиной 25 мм.

На рис. 8 приведена термограмма горения образца вершинного торфа, полученная при $\varepsilon = 0.96$. Данное значение ε определено в лабораторных условиях для диапазона длин вол 2.5-2.7 мкм. Как уже отмечалось выше, образец вершинного торфа представлял собой сам торф и располагающийся на нем чes из мхов и растений. Следует отметить, что в условиях эксперимента произошло воспламенение только образцов вершинного торфа. Воспламенения образцов низинного торфа не происходило. Можно предположить, что на это повлияла большая плотность, степень разложения низинного торфа, а также отсутствие проводника горения от полевого пожара к торфяному (чеса).



Рис. 8. Термограмма горения образцов чеса.

Следует отметить, что при горении вершинного торфа температура его поверхности достигала 890–970 К, а на границе примыкания образцов чеса и вершинного торфа был обнаружен пламенный режим горения, не характерный для торфа (выделенная область 1 на рис. 9). При этом температуры в зоне горения достигали значений 1020 К.

Во всех натуральных экспериментах, приведенных в данном отчете, производилось окашивание экспериментальных площадок в следующем порядке: полоса шириной не менее 3 метров с трех сторон (со стороны зажигания и по бокам вдоль направления распространения фронта горения), шириной 5 м в конце экспериментальной площадки. Этот подход обеспечивал нераспространение пожара за пределы экспериментальной площадки. Однако, если ветер резко менял свое направление и его порыв был достаточной силы, то полоса шириной 3 м не обеспечивала достаточной защиты от переноса пожара за пределы экспериментальной площадки.

Из данных фактов можно делать вывод, что для обеспечения пожарной безопасности объектов жизнедеятельности человека и населенного пункта достаточно производить регулярное окашивание периметра шириной не менее 5 м с удалением РГМ, а заборы для снижения риска их воспламенения делать продуваемыми. Следует отметить, что деревянные конструкции из бруса с естественным влагосодержанием, свойственным для жилых построек, при кратковременном воздействии степного пожара, возникающем при естественном продвижении фронта пожара под действием ветра, не получают значительных повреждений и не воспламеняются. Из этого следует, что тепловой энергии фронта

степного пожара, при запасе $0.172\text{--}0.263\text{ кг/м}^2$ недостаточно для воспламенения жилых домов из бруса, а их воспламенение возможно только при достаточно продолжительном воздействии огня, что возникает на практике при захлапленной придомовой территории, когда степной пожар поджигает вначале мусор, пиломатериалы, топливо, находящие в непосредственной близости от строения, а они в свою очередь являются причиной возникновения городских и поселковых пожаров.

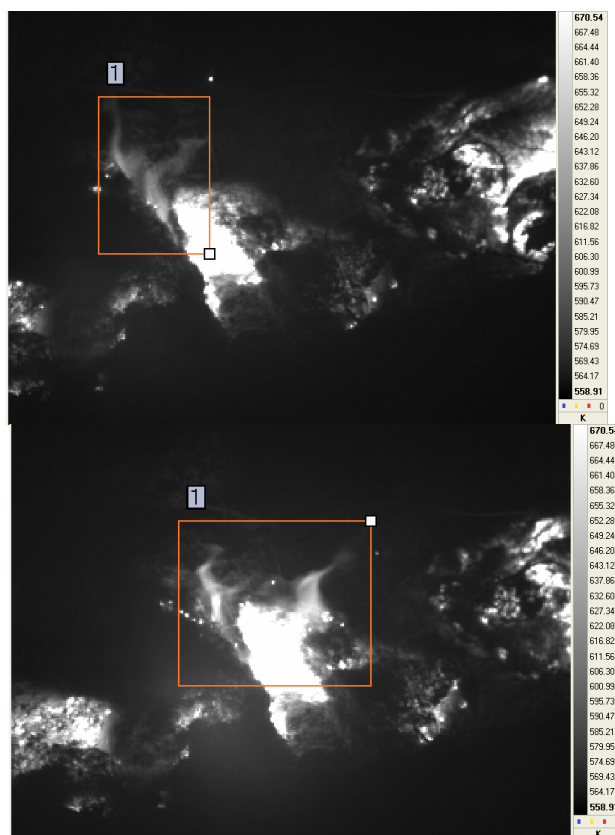


Рис. 9. Пламенный режим горения на границе между образцами чеса и вершинного торфа.

В результате анализа проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Для обеспечения безопасности объектов хозяйственной деятельности человека достаточно производить окашивание периметра объекта шириной не менее 5 м, с удалением скошенных РГМ.
2. Для снижения риска воспламенения заборов, они должны быть продуваемого типа.
3. Деревянные конструкции из бруса $200\text{ мм}\times 200\text{ мм}$ не воспламеняются под воздействием полевого пожара.
4. Полевой пожар переходит в торфяной при существовании проводника горения (чеса) над слоем торфа, даже при небольших запасах горючего ($0.172\text{--}0.263\text{ кг/м}^2$).

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Роснауки (г/к № 02.740.11.0674), Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-01-00673-а и № 10-01-91054-НЦНИ_а), Президента РФ (грант № МК-4331.2011.1).

Литература

1. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др. Физическое моделирование степных пожаров в природных условиях // Пожарная безопасность. 2010. № 2. С. 100-105.
2. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К. и др. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосферы и океана. 2007. № 1. С. 53-61
3. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. и др. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях // Вестник ТГУ. Математика и механика. 2011. № 2(14). С. 91-102.
4. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Исследования в динамике оптических характеристик инфракрасного излучения факела пламени в зависимости от вида растительных горючих материалов и влагосодержания // XVII Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: Сборник трудов [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2011. 1 CD-ROM. С. 229-232.
5. Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Воспламенение различных видов древесины лучистым потоком энергии // Физика горения и взрыва. 2011. № 1. С. 74-79.

Решение нестационарной задачи протекания в каналах при заданном перепаде давления

Е.Э. Гуммель, Ю.Н. Захаров

Кемеровский государственный университет

Практически важными являются задачи о движении воздуха в системах вентиляции в зданиях, подземных сооружениях (шахтах, метро) и т.п. Эти задачи, в силу малости скоростей движения среды и фактической ее несжимаемости, можно моделировать движением вязкой однородной несжимаемой жидкости, когда источником движения является перепад давления на концах разветвленного канала. Детальный анализ таких течений важен, например, при оценке загазованности отдельных участков угольных шахт. Поэтому целью настоящей работы является построение метода решения нестационарной задачи о движении в канале однородной вязкой несжимаемой жидкости при задании давления на входе и выходе канала.

Традиционно в задачах о течении в каналах однородной вязкой несжимаемой жидкости (система уравнений Навье – Стокса) рассматриваются две постановки задач: в первой, более популярной, на твердых стенках задается условие прилипания, а на участках втекания и вытекания – векторы скорости. Этому посвящено достаточно большое число работ (см., например, обзор в [4,7]). Вторая постановка заключается в задании на участках втекания-вытекания давления, а не скоростей. То есть движение жидкости в области протекания осуществляется за счет разности давлений. Таким образом, эти задачи приходится решать в формулировке «скорость-давление», а не в формулировке «функция тока-вихрь». В работе [6] показано, что для существования и единственности решения нестационарной задачи, кроме задания давления на участках втекания-вытекания, необходимо задать только одну из компонент скорости так, чтобы вектор скорости на границе втекания-вытекания был ей перпендикулярен. Однако, в этом случае отсутствие значения второй компоненты вектора скорости не позволяет без дополнительных условий на нее построить процесс численного решения таких задач. Обычно численно решаются задачи протекания в каналах с параллельными осям координат прямыми границами и углами (см. [3,8]). В этом случае на входе и выходе задаются «естественные» краевые условия на скорости вида $v = 0$, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

($u = 0$, $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$), которые позволяют построить алгоритмически замкнутый численный метод решения. В

этом случае условие на производную для одной из компонент вектора решения является прямым следствием условия $v = 0$ ($u = 0$). Однако такое «простое» определение скоростей на границе не всегда возможно. Дело в том, что эти условия на вторую компоненту являются, вообще говоря, «лишними» и, для того чтобы краевая задача с ними имела решение, необходимо, чтобы они были естественным образом согласованы с решением задачи, сформулированной без таких дополнительных условий. Таким образом, задание давления на границах канала не определяет направления вектора скорости на этих границах.

Рассмотрим двумерную задачу о протекании вязкой однородной несжимаемой жидкости в канале с заданным перепадом давления на входе и выходе

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \nabla V + \nabla p = \nu \Delta V, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} V = 0$$

$$p|_{AB} = p_1(y), \quad p|_{CD} = p_2(y), \quad V|_{BC} = 0, \quad V|_{AD} = 0, \quad (2)$$

$$(V, n)|_{AB} = |V|, \quad (V, n)|_{CD} = |V|, \quad (3)$$

где $V = (u(x, y, t), v(x, y, t))$ – вектор скорости, $p = p(x, y, t)$ – давление, $\nu > 0$ – коэффициент кинематической вязкости, Ω – область решения (см. рис.1).



Рис. 1. Область решения.

Равенства (3) означают, что вектор скорости V перпендикулярен границам AB и CD . Отметим, что на входных и выходных границах канала не поставлены условия на горизонтальную компоненту вектора скорости, что является одной из основных трудностей при решении рассматриваемой задачи.

Для рис. 4 $p_3 = 0.0953$. Как видно из рисунка, при уменьшении давления вихрь увеличился. При выходе на стационарное течение он занимает почти весь проход, на границе протекания некоторые линии тока направлены внутрь канала, некоторые – наружу.

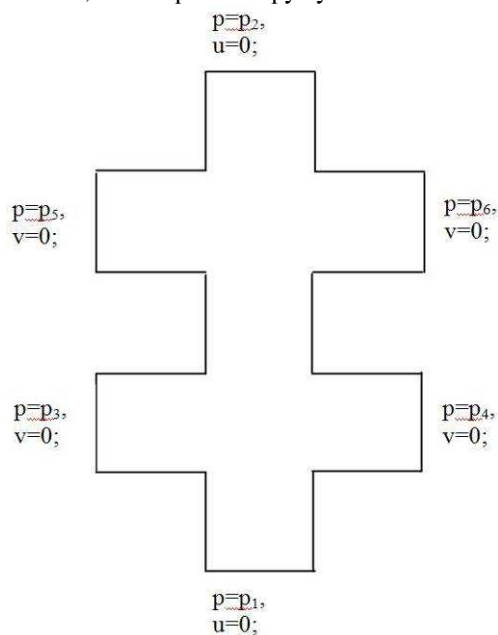


Рис. 2. Разветвляющийся канал.

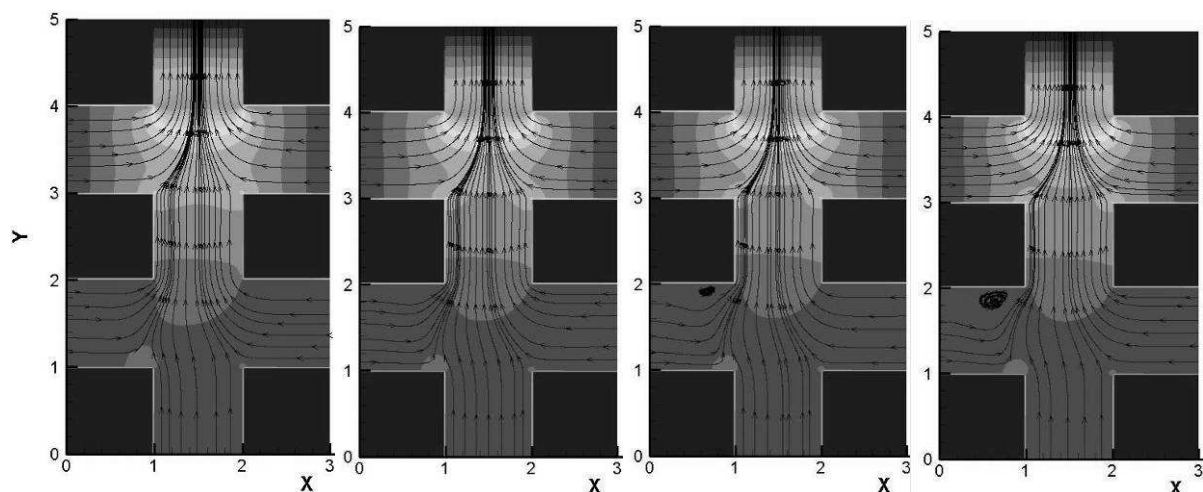


Рис. 3. Течение в канале, $p_3 = 0.096$, моменты времени $t=7.98; 12; 15.96; 19.68$ соответственно.

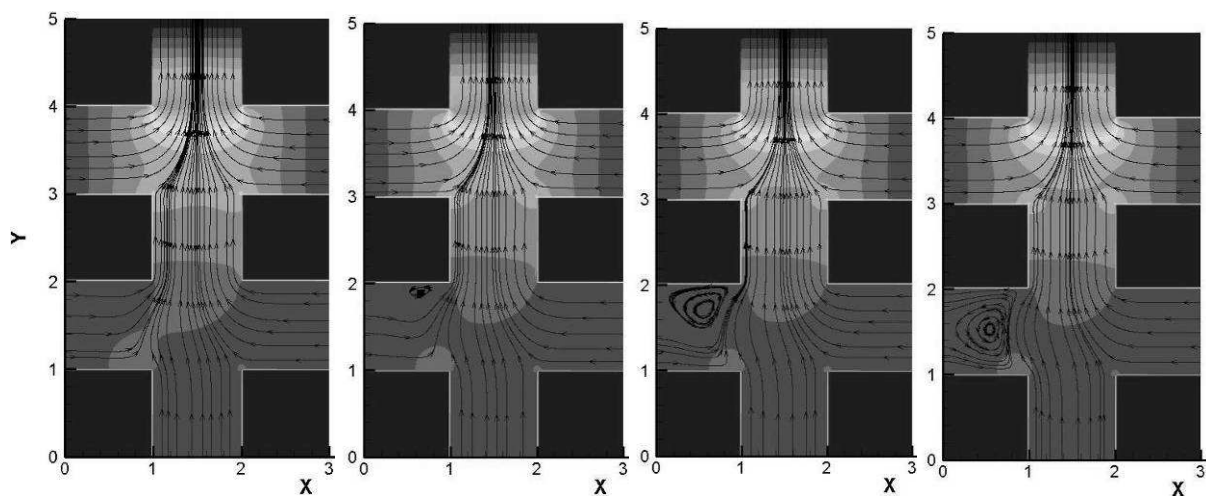


Рис. 4. Течение в канале, $p_3 = 0.0953$, моменты времени $t=7.98; 12; 15.96; 19.68$ соответственно.

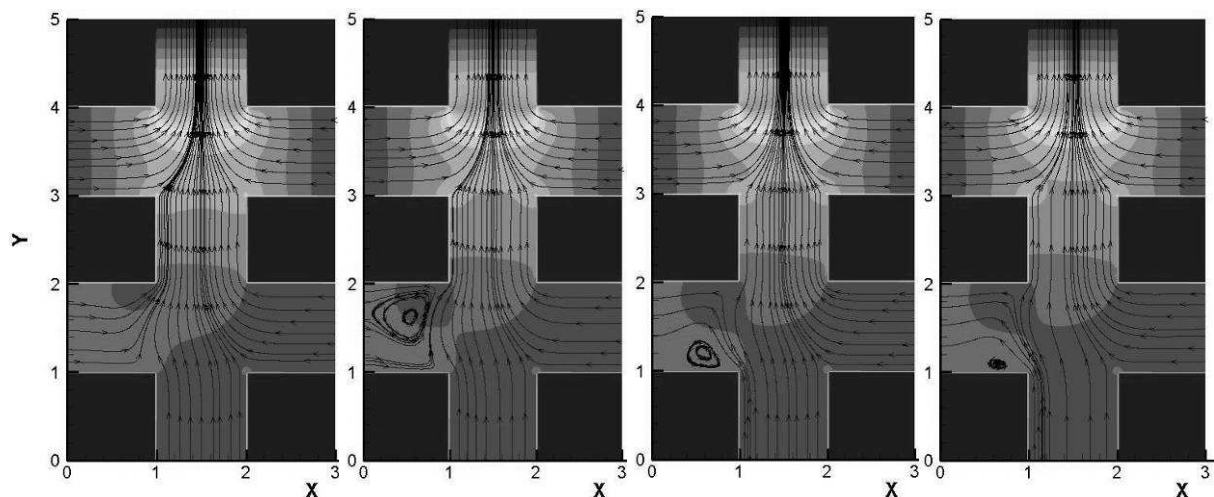


Рис. 5. Течение в канале, $p_3 = 0.0948$, моменты времени $t=7.98; 12; 15.96; 19.68$ соответственно.

На рис. 5 изображено течение при $p_3 = 0.0948$. Сначала жидкость втекает в канал. Затем в процессе стационарирования у верхней стенки появляется вихрь, который сначала растет, при этом на одной части границы жидкость втекает в канал, а на другой – вытекает из него. Далее вихрь уменьшается и смещается к нижней стенке прохода, а линии тока полностью меняют направление: жидкость вытекает из канала.

Таким образом, показано, что незначительные изменения давления приводят к качественно различным картинам течений.

Литература

1. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 520 с.
2. Захаров Ю.Н. Градиентные итерационные методы решения задач гидродинамики. Новосибирск: Наука, 2005. 239 с.
3. Кузнецов Б.Г., Мошкин Н.П., Смагулов Ш. Численное исследование течения вязкой несжимаемой жидкости в каналах при заданных перепадах давлений // Численные методы динамики вязкой жидкости: сб. ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1983. С. 203-207.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 124 с.
6. Рагулин В.В. К задаче о протекании вязкой жидкости сквозь ограниченную область при заданном перепаде давления или напора // Динамика сплошной среды: сб. научн. тр. Новосибирск, 1976. Вып. 27. С. 78-92.
7. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. 612 с.
8. Moshkin, N., Yambangwi D. Steady viscous incompressible flow driven by a pressure difference in a planar T-junction channel // Intern. J. of Comput. Fluid Dyn. 2009. Vol. 23, N 3. P. 259-270.

Предварительная оценка точности определения координат землетрясений в системе сейсмологических наблюдений для службы предупреждения цунами (СПЦ)

О.К. Омельченко¹, В.К. Гусяков², В.Н. Чебров²

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский

В настоящее время в дальневосточном регионе модернизируется национальная Система Предупреждения о Цунами (СПЦ). В 2006-2010 гг. Геофизической службой РАН создана сейсмическая подсистема СПЦ [1, 3, 4], в которую входят 5 опорных цифровых сеймостанций (ОЦС): Петропавловск (PET), Южно-Сахалинск (SSH), Южно-Курильск (YUK), Северо-Курильск (SKR), Усть-Камчатск (KVG) и 6 вспомогательных станций (ВЦС): Владивосток (MSH), Курильск (KUR), Малокурильское (SHO), Тиличики (TL1), Оха (OKH), Никольское (Беринг, ВКИ). Кроме того, у каждой ОЦС имеются выносные пункты (ВП). У станции Петропавловск [4] это – Школа (SCH), НИИГТЦ (НИ), Николаевка (NIC), Институт (IVS), Рыбачий (RIB), Звездный (SPZ). У станции Южно-Сахалинск [1] это – Долинск (DOL), Корсаков (KOR), Невельск (NEV), Холмск (KHL). У станции Усть-Камчатск это – Автодор (UK4), Администрация (UK1), Водоканал (UK2), Морской порт (UK3). А у станции Северокурильск это – Плато (SK2) и Шумшу (SK3). В настоящий момент задействованы 16 выносных пунктов.

В сейсмическую подсистему СПЦ входят также пункты регистрации сильных движений (ПР СД). Для повышения достоверности оценок параметров землетрясений привлекаются данные региональных станций и станций мировой сети IRIS.

В настоящей работе проводится предварительный анализ сейсмической подсистемы СПЦ для оценки точности определений параметров гипоцентров землетрясений по данным входящих в нее сетей в разных конфигурациях. В качестве скоростной модели среды взят годограф Джеффриса – Буллена. Погрешность скоростной модели среды взята равной 0.1 км/сек, а погрешности снятия времен вступления волн на станции сети взяты равными 0.1 сек.

Еще при решении задачи планирования ЕАСЦ [2] была проделана большая работа по правильному выбору зоны преимущественного расположения гипоцентров цунамигенных землетрясений. Координатами этой зоны мы воспользуемся и здесь.

Приведем теперь результаты анализа некоторых вариантов конфигурации сейсмических сетей СПЦ, математическая суть которого подробно описана в работе [2].

А именно она состоит, в частности, в вычерчивании для анализируемых сетей карт изолиний доверительного радиуса по эпицентру и доверительного интервала по глубине сейсмических событий. На всех приведенных рисунках вышеупомянутая зона преимущественного расположения гипоцентров цунамигенных землетрясений отмечена звездочками, опорные станции обозначены черными квадратами, вспомогательные станции – треугольниками, выносные пункты – кружочками, а станции IRIS – перевернутыми треугольниками.

На рис. 1 и 2 приведены результаты анализа сети 5 опорных станций (ОЦС).

На рис. 3 приведены результаты анализа сети из 5 ОЦС и 6 ВЦС.

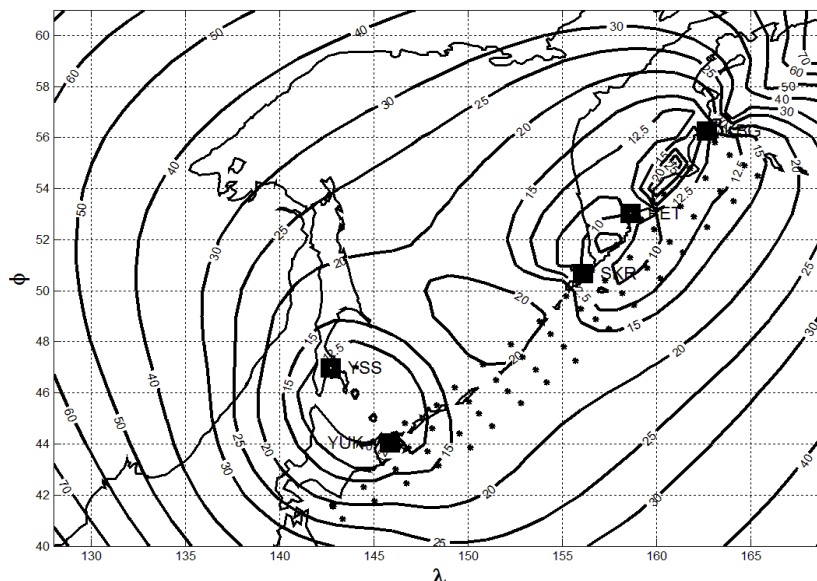


Рис. 1. Сеть из 5 станций. Карта изолиний доверительного радиуса по эпицентру, средний по всей области доверительный радиус по эпицентру равен 30.3 км., а по зоне 14.9 км.

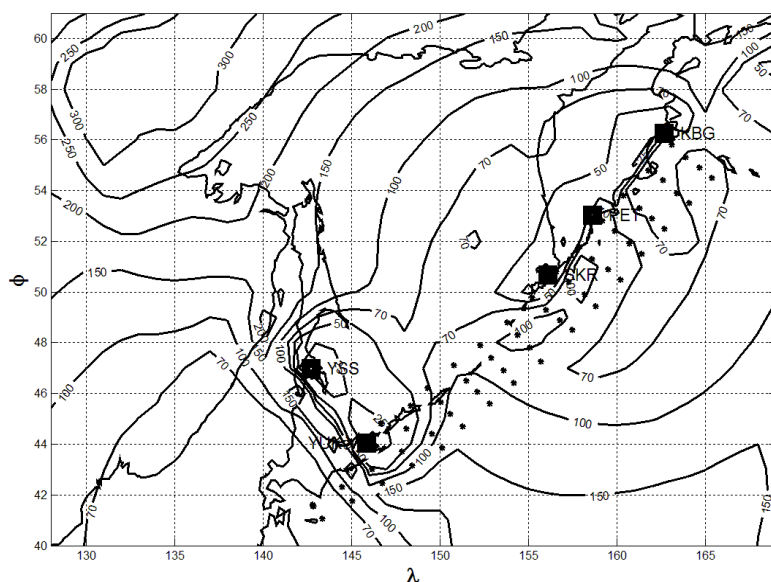


Рис. 2. Сеть из 5 станций. Карта изолиний доверительного интервала по глубине, средний по всей области доверительный интервал по глубине равен 126.9 км., а по зоне 71.2 км.

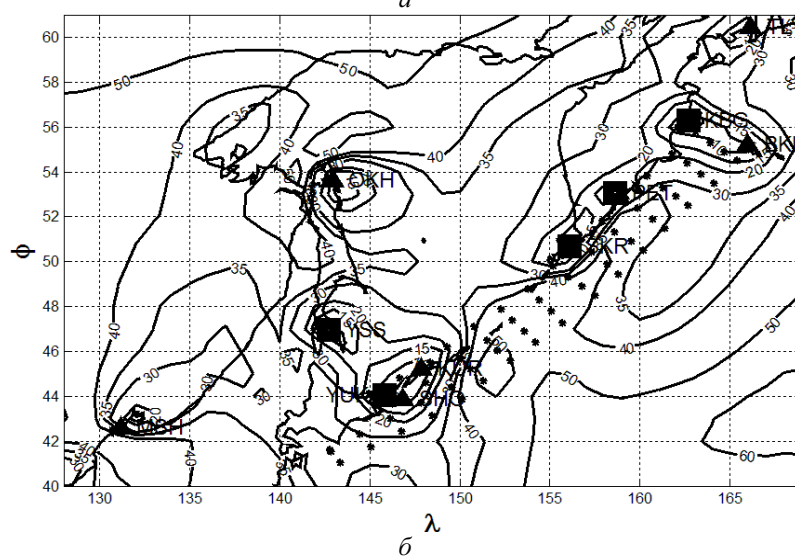
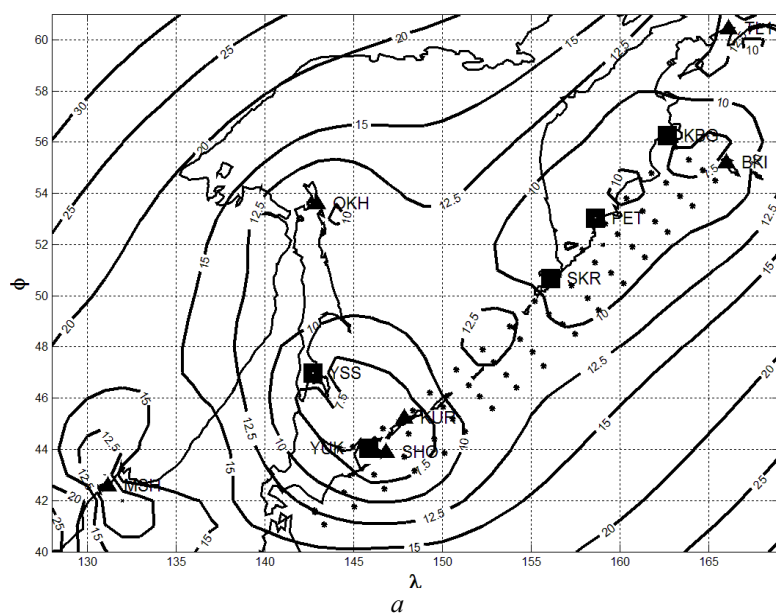


Рис. 3. Сеть из 11 станций. Карты изолиний доверительного радиуса по эпицентру (а) (средний по всей области доверительный радиус по эпицентру равен 15.4 км., а по зоне 9.4 км) и по глубине (б) (средний по всей области доверительный интервал по глубине равен 38.6 км., а по зоне 27.3 км.).

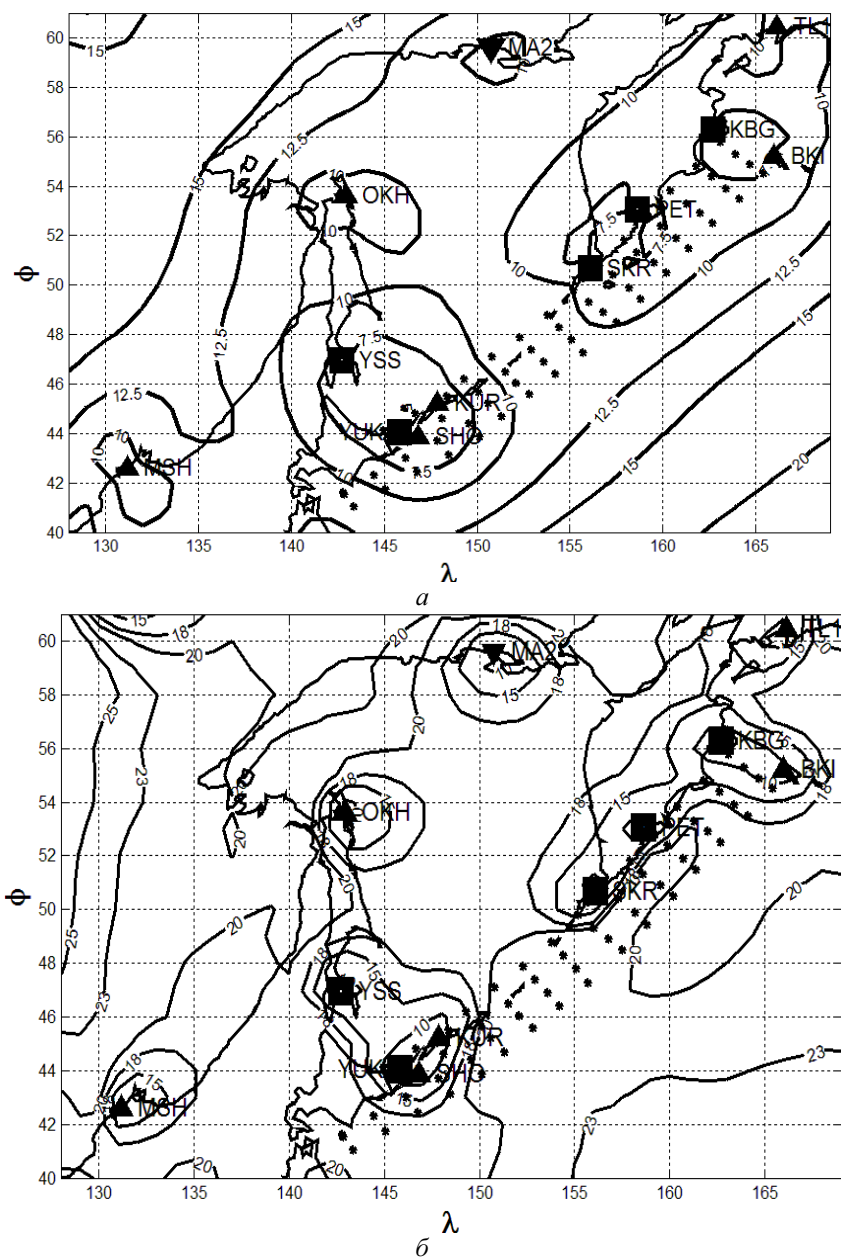


Рис. 4. Сеть из 19 станций. Карты изолиний доверительного радиуса по эпицентру (а) (средний по зоне доверительный радиус по эпицентру равен 8.7 км., а по всей области – 12.2 км.) и по глубине (б) (средний по зоне доверительный интервал по глубине равен 16.3 км., а по всей области 19.6 км.).

На рис. 4 приведены результаты анализа сети из 5 ОЦС, 6 ВЦС и 8 станций IRIS.

Заключение

Предварительные оценки точности определений параметров гипоцентров землетрясений, полученные аналитическим путем, демонстрируют их устойчивость для разных комбинаций сетей.

Конфигурация сейсмической подсистемы СПЦ обеспечивает оценку параметров гипоцентров землетрясений по всей зоне ответственности в пределах допустимых ошибок.

Литература

1. Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З., Чебров В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами. // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, № 1.
2. Омельченко О.К., Гусяков В.К. Планирование сети сейсмических станций для службы предупреждения о цунами // Вулканология и сейсмология. 1996. № 2. С. 68-85.
3. Чебров В.Н., Гусев А.А., В.К. Гусяков В.К. и др. Концепция развития системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45, № 4. С. 41-57.
4. Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Захарченко Н.З. и др. Опорная сейсмическая станция «Петропавловск» для службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2010. Т.46. № 1.

Мониторинг угла наклона повторяемости в техногенной последовательности землетрясений

А.Ф. Еманов, А.Г. Филина, А.В. Фатеев, В.Г. Подкорытова, Л.А. Подлипская, Е.В. Шевкунова.

Алтае-Саянский филиал Геофизической службы Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск

График повторяемости землетрясений первоначально получен как фундаментальная экспериментальная зависимость, характеризующая процесс высвобождения сейсмической энергии в неглубоких землетрясениях как в отдельной сейсмогенной области, так и на Земле в целом [1,6]. Более поздние исследования привели к интерпретации закона повторяемости с точки зрения иерархии блокового строения земных недр [4]. Иерархия сохраняется в очень широком диапазоне энергий, включающем как землетрясения с магнитудой порядка 7, так и микроземлетрясения. Значительное число работ, использующих график повторяемости, появилось в середине-конце прошлого века в связи с прогнозом землетрясений. Изменение угла наклона γ трактуется в них как прогностический параметр. При этом зачастую вывод делается на основе малых статистик наблюдений. В связи с необходимостью более четкого представления о возможных вариациях угла наклона в зависимости от метода расчета и величины статистики в [3] был проведен численный эксперимент, позволивший определить оптимальные значения величины статистики для получения оценки γ с заданной точностью. Ранее [8] было показано, что ММП в отличие от метода наименьших квадратов (МНК) дает несмещенную оценку. В работах этих же авторов проведена обработка экспериментальных данных и получены свидетельства постоянства угла наклона в разных районах. В 2011 г. опубликована статья [7], в которой теоретически показано, что развитие процесса накопления «дестабилизаций» в земной коре в условиях взаимодействия блоков различных уровней иерархии приводит к различным сценариям высвобождения энергии, одним из которых являются землетрясения. Получено, что в широком диапазоне энергий закон повторяемости имеет наклон порядка 0.5.

Задачей настоящей работы было проанализировать поведение угла наклона графика повторяемости при техногенной активизации в 2007-2008 гг. в районе г.Полысаево (Кузбасс). Там возникла область значительной сейсмической активности, скоррелированной с работой угольного комбайна[2]. Выставленная сеть сейсмических станций дала возможность зарегистрировать около 1400 землетрясений в диапазоне энергетических классов от -1 до 9. Из каталога землетрясений были сделаны три последовательные во времени выборки: за ноябрь 2007 г., декабрь 2007 г. и январь 2008 г. Каждая выборка содержит от 300 до 500 землетрясений. Угол наклона кумулятивного графика повторяемости рассчитывался в каждой выборке последовательно по 100, 130, 160 и т.д. событиям до конца данной выборки. Ход угла наклона показан на рис. 1. В начале каждой выборки статистика мала и погрешность может быть больше 0.1, а конечные значения получены в условиях достаточности статистики с точностью не порядка 0.05. Несмотря на то, что исходные данные для расчета никак не «организовывались», на графике отчетливо прослеживается ход во времени угла наклона: начальные значения составляют порядка 0.8 конечные – 0.4, сейсмический процесс в активизации начинаясь как явно не похожий на тектонический заканчивается на уровне γ , соответствующем тектоническим землетрясениям. Для более наглядной иллюстрации этого факта аналогичным образом был рассчитан угол наклона графика повторяемости для фрагмента афтершоковой последовательности Чуйского землетрясения. Количество событий в последовательных выборках такое же, как в Полысаево. На рис. 2 оба расчета сведены на один график. В естественной последовательности существенных изменений γ не происходит, что особенно заметно на фоне техногенной: значение γ на уровне 0.4-0.5 сохраняется на протяжении всех трех выборок. В последней выборке такое же значение приобретает γ техногенной последовательности. Возможно, что подобный тренд γ означает, что среда реагирует на возмущение в виде нарушения горного массива в процессе выработки так же как на нарушение равновесия, приводящее к тектоническому землетрясению. Так или иначе на данном примере видно, что на протяжении одной активизации в техногенном случае сейсмический режим может вести себя как тектонический.

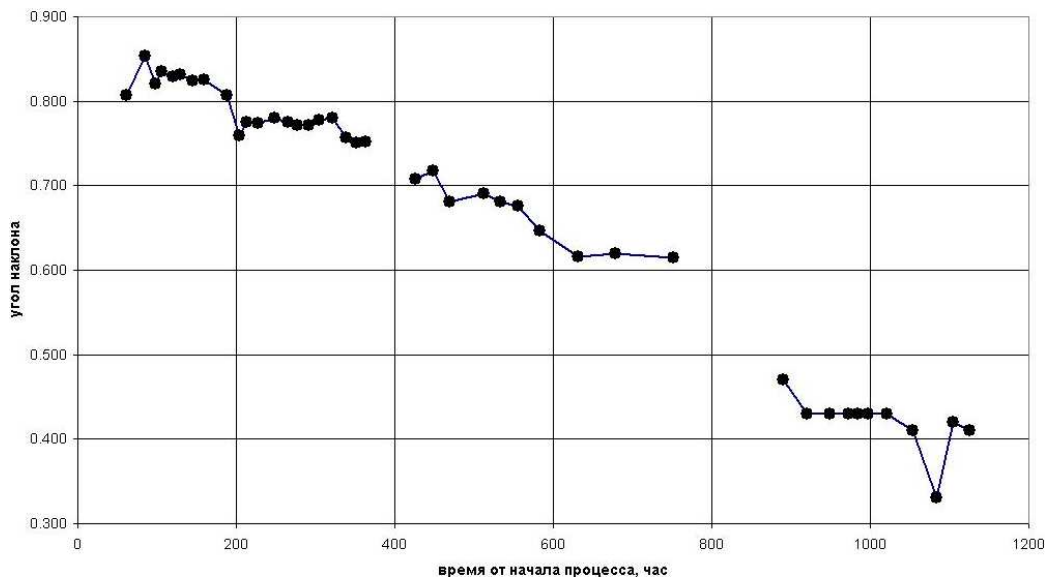


Рис. 1. Ход во времени абсолютной величины угла наклона графика повторяемости по трем выборкам из каталога активизации из р-на г. Польшаево.

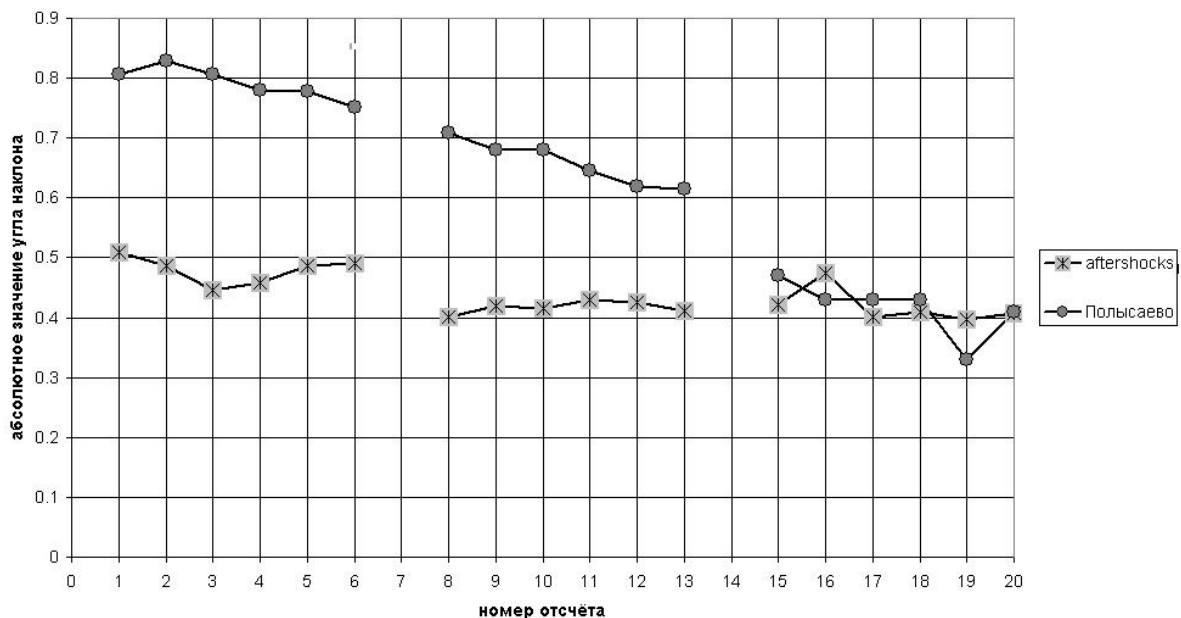


Рис.2. Ход во времени абсолютного значения γ в активизации Польшаево и в афтершоковой последовательности Чуйского землетрясения.

Литература

1. Голицын Г.С. Место закона Гуттенберга-Рихтера среди других статистических законов природы // Вычислительная сейсмология. М.: Геос, 2001. С. 138-161.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. и др. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12, № 1. С. 37-43.
3. Жалковский Н.Д., Мучная В.И. О точности определения наклона графика повторяемости землетрясений // Геология и геофизика. 1987. № 10. С. 121-129.
4. Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 96 с.
5. Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и натурного моделирования // Физика Земли. 2010. № 2. С. 17-49.
6. Gutenberg B, Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration // Bull. Seism. Soc. Amer. 1942. Vol. 32. P. 163-191.
7. Sibiriyakov B.P., Prilous B.I., Kopeykin A.V. The nature of instabilities in blocked media and seismological law of Gutenberg-Richter // WSEAS Trans. on applied and Theoretical Mechanics. Vol.6, Is. 2. April 2011. P. 69-70.
8. Utsu T. Afterchocks and earthquake statistis (III) // J. of the Sci. Hokkaido University. 1971. Ser. VII (Geophysics). Vol. III, N 5.

Модели и алгоритмы анализа состояния сложных литологических структур

Р.Ю. Замараев

Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, Новосибирск

Актуальность

Среди природных катаклизмов сейсмические явления по тяжести последствий относятся к самым опасным. Задачи предсказания землетрясений по массивам наблюдений и предвестникам различной физической природы решаются в рамках многочисленных научных направлений. В том числе решаются некорректные обратные задачи математического моделирования, направленные на определение собственных свойств генераторов и передающих динамических систем. Значительные трудности для идентификации параметров динамических и статистических моделей создает существенная (априорная) нестационарность сейсмических процессов, которая проявляется как в самом факте появления высокоэнергетического события, так и в структурах сейсмических сигналов к этому событию привязанных.

Отдельно установим акцент на том, что высокоэнергетическое сейсмическое событие, определяемое как природная катастрофа, проявляется не только на поверхности. Крупное землетрясение может и должно приводить к перестройке генератора и глубинных литологических структур, играющих роль передающих трактов.

Отсюда актуальной становится задача диагностики состояния сложных литологических структур. Без специфических диагностических моделей и алгоритмов, подтверждающих неизменность (малую вариацию) структуры динамической системы, результаты идентификация или статистические модели показателей, построенные на осреднении и регрессиях, окажутся некорректными.

Предлагаемый подход сам по себе не является исключительным. Например, в работе [1] диагностическая и прогностическая задачи решаются с помощью специализированных математических конструкций на основе вейвлет-преобразования сейсмологических сигналов. Настоящую работу отличают оригинальные информационные модели данных, допускающие построение сложных комбинаций сигналов в пространственной области для сравнения и диагностики изменения видов состояния динамических.

1. Базовые модели

В основе предлагаемых алгоритмов анализа состояния лежит группа моделей *информационного* типа [3]:

- энтропийная модель $\mathbf{E} = -\mathbf{q} \ln(\mathbf{q})$;
- логарифмическая модель $\mathbf{L} = \left\{ \frac{\partial E_i(\mathbf{q})}{\partial q_i} \right\} = -1 - \ln(\mathbf{q})$;
- гиперболическая модель $\mathbf{R} = \left\{ \frac{\partial L_i(\mathbf{q})}{\partial q_i} \right\} = -\frac{1}{\mathbf{q}}$;

где $\mathbf{q} = \mathbf{x} / S$ – вектор долей, эквивалентных вероятности выбора i -го элемента из вектора исходных данных $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_m\}$ о значениях некоторого показателя X ; $S = \sum_i x_i$ – сумма элементов вектора \mathbf{x} .

Связанные дифференцирования эти модели воспроизводят для вектора исходных данных фазовое пространство или пространство видов состояния, сопоставляемых в интерпретации моделей с количеством информации в значении i -го элемента.

Дополнительные процедуры стандартизации логарифмической и гиперболической моделей

$${}^s \mathbf{L} = \frac{\mathbf{L} - M[\mathbf{L}]}{\sigma[\mathbf{L}]}, \quad {}^s \mathbf{R} = \frac{\mathbf{R} - M[\mathbf{R}]}{\sigma[\mathbf{R}]}$$

позволяют нивелировать масштаб исходных данных и снять неопределенность с определением долей для интенсивных показателей.

Требуемым свойством введенных моделей данных является аддитивность, причем, как между элементами одной модели, так и между моделями различных показателей одноименных объектов заданных индексом i . Это свойство вытекает из представления группы энтропийных моделей $\{\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_n\}$, построенных для набора показателей X_1, \dots, X_n , как о модели многоканального генератора энтропии, представленного сообщениями $\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$.

Для решения диагностических задач по набору показателей X_1, \dots, X_n введена и обоснована *обобщенная энтропийная модель*

$$\mathbf{E}_{\Sigma, V-W} = \left\{ \sum_{j \in V} -q_{i,j} \ln(q_{i,j}) - \sum_{j \in W} -q_{i,j} \ln(q_{i,j}) \right\}_{i=1, \dots, m},$$

где V и W – подмножества позитивных и негативных показателей соответственно. Она описывает разность интенсивностей прироста по i энтропии генератора между двумя группами сообщений. Ее можно также рассматривать как фильтр, который поэлементно трансформирует обобщенную энтропийную модель по подгруппе показателей V в обобщенную модель по подгруппе показателей W .

Кросс-аддитивность элементов в группе энтропийных моделей открывает важный тип моделей *информативности*. Их построение заключается в процедуре извлечения вектора значений частных энтропий (и производных моделей) показателей для избранного элемента системы, т.е. при $i = const$ с последующей стандартизацией:

$$\mathbf{E}_i = \frac{\{E_{i,j=1}, \dots, E_{i,j=n}\} - M[\{E_{i,j=1}, \dots, E_{i,j=n}\}]}{\sigma[\{E_{i,j=1}, \dots, E_{i,j=n}\}]}.$$

Интерпретация такой модели очевидна: каждый элемент вектора \mathbf{E}_i есть энтропия j -го показателя при i -ом элементе. Таким образом, имеем модель интенсивности приращения по каждому показателю полной энтропии i -го *объекта*. Принципиальное отличие инвертированных моделей от базовых состоит в том, что их компонентами являются информационные характеристики показателей, а не объектов. Так что оценки состояния и другие характеристики будут относиться уже к ним, а не к объектам.

При моделировании сигналов следует учитывать их отличие от выборок: i -й отсчет показателя по времени не является автономным объектом и не характеризует какое-либо состояние системы. Характеристикой состояния является количество информации произведенное системой к моменту времени t от начала отсчета $t = 0$ [2].

Исходя из физических принципов регистрации сейсмических сигналов в работе рассматривается замена исходной формы на вектор модулей размахов колебаний между i -ым и $i+1$ -ым отсчетами как представление траектории движения материальной точки – центра масс измерительной системы: $s_i = |x_{i+1} - x_i|$. Тогда количество информации, приходящееся на i -ый отсчет определяется как кумулятивная функция частных энтропий размахов

$$\mathbf{H}_C = \left\{ \sum_{k=1}^i - \frac{s_k}{\sum_{i=1}^{m-1} s_i} \ln \left(\frac{s_k}{\sum_{i=1}^{m-1} s_i} \right) \right\}_{i=1, \dots, m-1}.$$

Анализ динамических систем с помощью энтропийных моделей сигналов позволяет снять ограничения по размерности и рассматривать на универсальных принципах сигналы с неустановленной эргодичностью и стационарностью, поскольку в алгоритме построения энтропийных моделей никаких условий к этим свойствам данных не выдвигается.

2. Постановка задачи

Основная идея применения аппарата энтропийного моделирования для сигналов состоит в поиске и сравнительном анализе наборов сейсмологических сигналов. Предлагается новый взгляд на землетрясение как на своеобразный Вупр-тест передающих систем между эпицентром и станциями наблюдения. Так могут быть рассмотрены записи одного события с нескольких станций для сравнения условий прохождения сейсмических волн по различным трактам. Также можно рассмотреть записи с одной станции нескольких событий, относящихся к одному сейсмически активному району для оценки изменений в генераторе в ряду катастрофических событий.

На настоящем этапе развития исследований производится, прежде всего, оценка продуктивности энтропийных моделей при исследовании сейсмологических сигналов: наличие и различимость особенностей в моделях для сравнения и диагностики изменений в передающих динамических системах.

Дискуссионным в работе остается вопрос принципа синхронизации сигналов в наборах для обеспечения сопоставимости объектов-отсчетов по фазам прохождения сейсмической волны.

3. Примеры

Предлагаемые модели опробованы на примере известного Алтай-Саянского землетрясения от 27.09.2003г. Из базы данных IRIS DMC (www.iris.edu) были извлечены сейсмограммы о крупном сейсмическом событии от 27.09.2003г. 11:33 с привязкой к первому вступлению p -волны с трех станций: IU.ULN – Улан-Батор (Монголия); IC.WMQ – Урумчи (Китай); IC.XAN – Чжан (Китай). На рис. 1 показано географическое расположение станций и эпицентра. На рис. 2 показаны формы сигналов в нормированном масштабе со станций по трем ортогональным направлениям: E – восточное; N – северное; Z – вертикальное. На рис. 3. приведены энтропийные и логарифмические модели этих сигналов.

Проявившаяся группировка моделей по станциям позволяет сделать важный для последующего анализа вывод: ортогональное разложение пространственных колебаний измерительных систем станций никоим образом не совпадает с осями их главных колебаний и не отражает физических представлений о продольных и поперечных сейсмических волнах. Информация о структуре главных колебаний «размазана» по трем компонентам и ее требуется собрать в единое представление с помощью обобщенных моделей.

Качественные различия передающих трактов станций на рис. 2 хорошо просматриваются: заметно влияния диссипации энергии генератора по мере удаленности станции, от минимума на станции WMQ до максимума на XAN; на самой удаленной станции XAN обнаруживается «вливание» дополнительной информации, слабо искажившей энтропийную модель, но проявившейся на производной логарифмической модели.

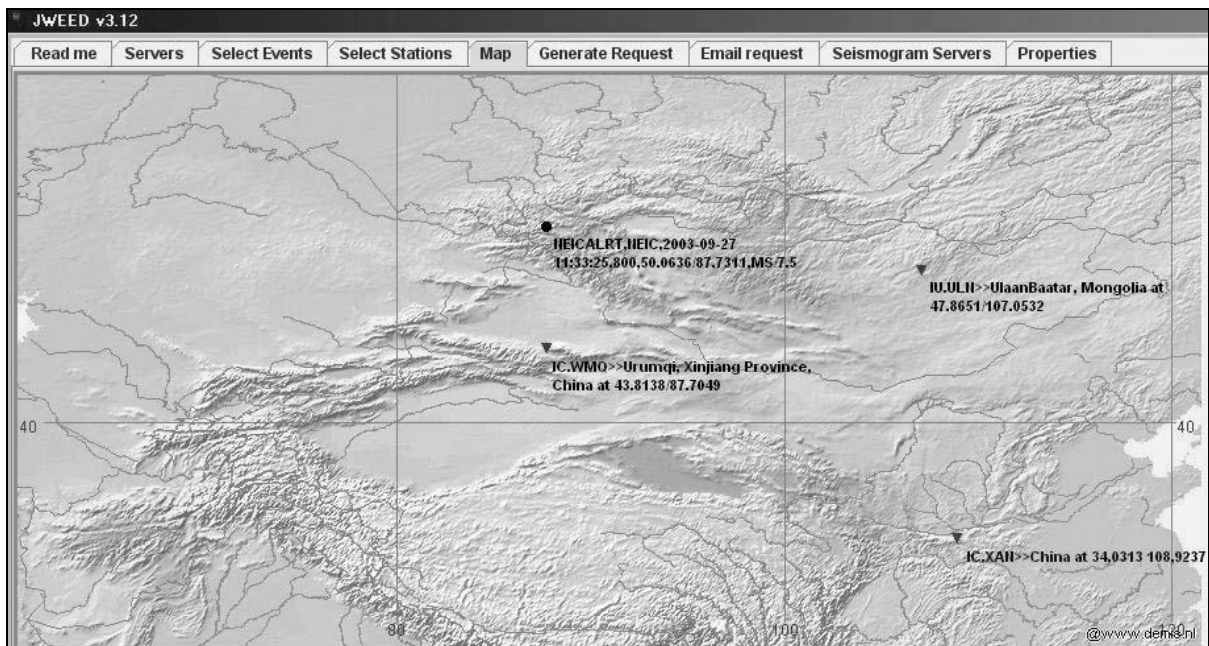


Рис. 1. Географическое положение сейсмических станций и эпицентра землетрясений.

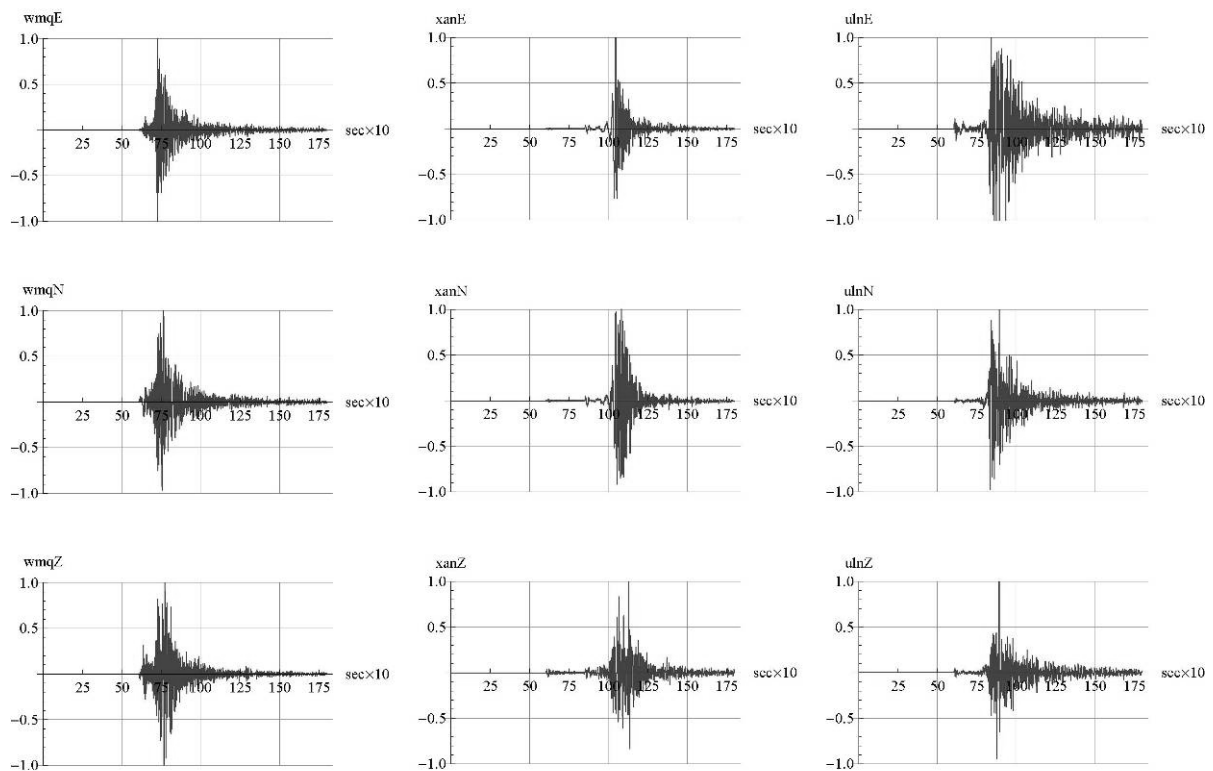


Рис. 2. Формы сигналов с трех станций события от 27.09.2003, 11:33.

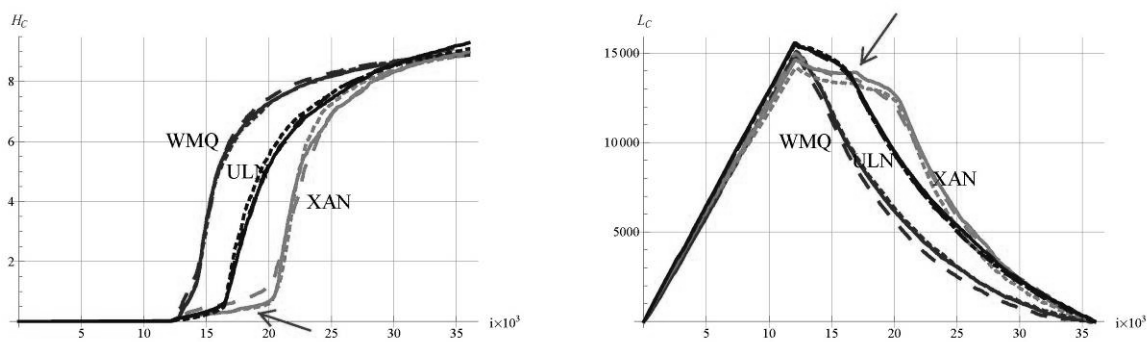


Рис. 3. Энтропийные (слева) и логарифмические (справа) модели сейсмограмм события от 27.09.2003, 11:33.

Построение моделей информативности (рис. 4) позволяет увидеть изменение соотношений приращений количества информации в сигналах по направлениям, стадиям и станциям. Например, в энтропийной модели (рис. 4. слева) после выравнивания краевого эффекта (маркер 1) видим установившиеся приращения количеств информации на станциях. В виду удаленности станции XAN и, следовательно, больших потерь энергии в тракте шумовая составляющая до первого вступления p -волны (маркер 2) обеспечивает большой прирост информации в сигнале по сравнению со стадией основных колебаний относительно других станций.

После прохождения по трактам основной части энергии (маркер 3) наблюдается нарушение согласованности компонент на станциях – большой вес приобретают характеристики трактов вблизи станций, локальные резонансы и т.п. эффекты. Как и до вступления основных колебаний, на станции XAN эти явления проявились наиболее ярко.

Таким образом, при построении (идентификации) моделей трактов от эпицентра к станциям самой представительной и пригодной для осреднения частью сейсмограмм следует признать участок между маркерами 2 и 3. Также можно отметить отсутствие каких-либо особенностей второй производной – гиперболической модели информативности набора сигналов (рис. 4, справа). После вступления p -волны (маркер 2) ускорения приращений количества информации в сигналах испытывают незначительные флуктуации. Значит, аномалия, обнаруженная на рис. 3 в сигналах станции XAN носит кинематический характер и не связана с появлением в тракте дополнительного автономного генератора.

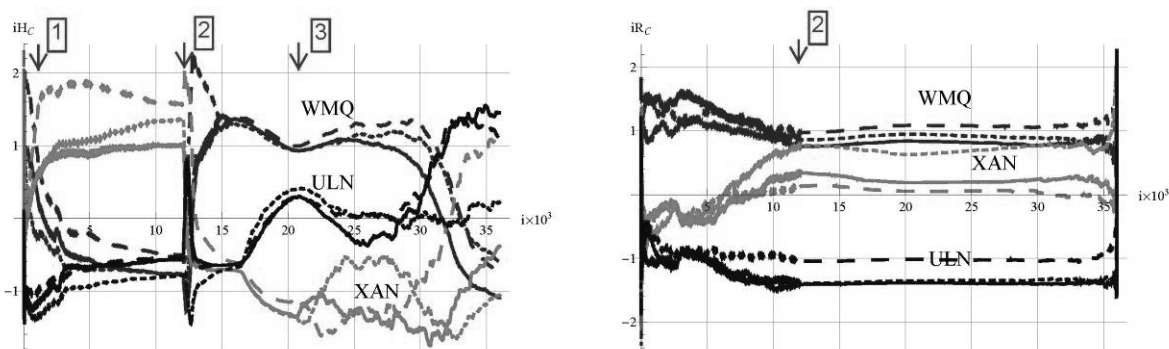


Рис. 4. Энтропийная (слева) и гиперболическая (справа) модели информативности набора сигналов с трех станций

Принципиальным результатом анализа сейсмограмм одного события с трех станций является заключение о наличии и интерпретируемости особенностей энтропийных моделей сигналов, связанных с априорными отличиями передающих динамических систем. Отсюда следует важный вывод: если энтропийные модели сейсмических сигналов в ряду последовательных наблюдений одного сейсмического района на одной и той же станции покажут аналогичные радикальные отличия, то можно обоснованно говорить об изменении вида состояния самого генератора, полагая существенные изменения структуры передающего тракта маловероятными.

Это предположение проверено на сейсмограммах со станции ULN (Улан-Батор) за 2003 г. для этого же сейсмического района. Были обнаружены заметные события с магнитудами более 5 от: 27.09.2003 13:16 (ULN1); 27.09.2003 18:52 (ULN2); 01.10.2003 01:03 (ULN3); 17.11.2003 01:35 (ULN4). На рис. 5 для каждой даты показаны обобщенные по трем направлениям энтропийные модели и модели информативности.

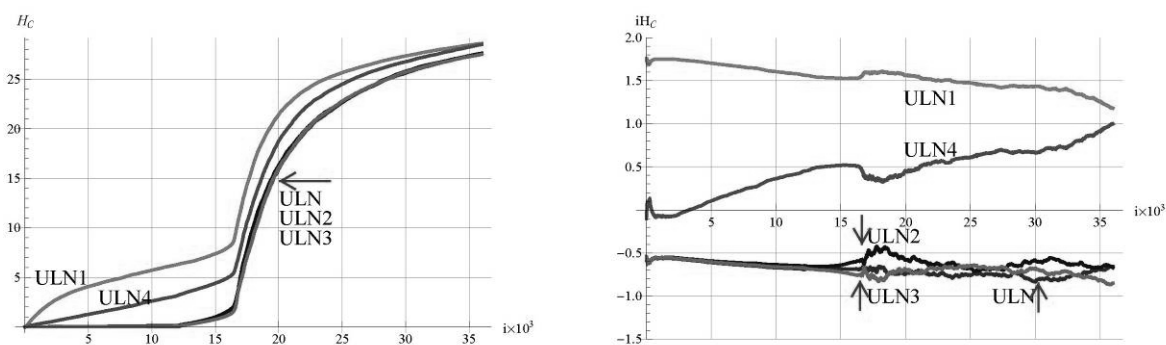


Рис. 5. Обобщенные по трем направлениям энтропийные модели (слева) пяти наблюдений и модели информативности (справа) набора сигналов с одной станции

Из качественных свойств этих моделей следуют важное заключение: рассматриваемый сейсмический генератор за выбранный период трижды поменял вид состояния. В результате основного землетрясения (модель ULN) в 11:33 от 27.092003 вид состояния изменился, что привело к модели ULN1 следующего события в 13:16. Потом произошел возврат! к начальному виду состояния и события в 18:52 от 27.09 (модель ULN2) и в 01:03 от 01.10 (модель ULN3) получили почти идентичный основному землетрясению вид моделей. Но, в итоге, накопившиеся изменения привели опять к новому виду состояния, что отразилось в последнем отмеченном землетрясении в 01:35 от 17.11 (модель ULN4).

Заключение

Представленные модели и алгоритмы рассматриваются как раздел для систем мониторинга сейсмически активных районов, предлагающий для геофизики новый инструмент анализа и классификации сейсмических событий. Показанное явление перемежающихся видов состояния природного сейсмического генератора позволяет строже подойти к моделированию и идентификации его параметров.

Литература

1. Богданов В.В., Геппнер В.В., Мандрикова О.В. Моделирование нестационарных временных рядов геофизических параметров со сложной структурой. С.-Пб.: ЛЭТИ, 2006. 108 с.
2. Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. 304 с.
3. Логов А.Б., Замираев Р.Ю., Логов А.А. Анализ состояния уникальных объектов. М.: Машиностроение, 2010. 336 с.

Моделирование катастрофических гляциальных паводков в горах Алтая и на юге Западно-Сибирской равнины

И.Д. Зольников, Н.В. Глушкова, С.А. Семенова

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

Катастрофические гляциальные паводки различного объема представляют собой природные явления достаточно типичные для областей оледенений, как современных, так и древних. Наиболее известными являются позднечетвертичные гляциальные суперпаводки колумбийского плато, которые формировались за счет прорыва озера Миссула (США). Благодаря работам российских [6, 13, 14, 16 и др.], а затем и зарубежных исследователей [1-3 и др.] широкую международную известность приобрели катастрофические гляциальные паводки Горного Алтая, которые формировались в позднем неоплейстоцене. Геологические данные свидетельствуют о широком распространении отложений суперпаводков на юге Западной Сибири [11]. Что касается геологической роли катастрофических потоков с гор Алтая в формировании отложений юга Западно-Сибирской равнины, то по данному вопросу мнения альтернативны. Одни исследователи лишь осторожно ограничиваются высказываниями типа: «Несомненно, что сброс значительного количества пресных вод не мог не оставлять соответствующих следов на равнинных территориях» [13, стр. 126]. Однако, с другой стороны, на конференциях неоднократно приходилось слышать, что: «На равнине паводки должны распластываться, терять высоту и способность оказывать воздействие на отложения и рельеф; поэтому и маловероятно присутствие их следов на равнине». Многим геологам до сих пор трудно представить себе гигантские паводки настолько масштабного характера, что для обозначения соответствующего генетического типа рельефа и отложений А.Н. Рудым [14] был предложен термин «диллювий». Некоторыми учеными аргументация из области обсуждения геологических фактов уводится в область веры или неверия в реальность катастрофических суперпаводков. Поэтому, большую роль имеет моделирование катастрофических потоков рассматриваемого масштаба не только в горах Алтая, но и на юге Западно-Сибирской равнины.

Геоинформационное моделирование на цифровых моделях рельефа

Моделирование катастрофических паводков в горах Алтая в основном ориентировано на расчет предполагаемых скоростей потока, его глубины, расходов и других гидрологических показателей [1-3, 6, 14 и др.]. В целом, для горного участка долин Чуи и Катуня глубина потока реконструировалась до 400-500 м, а скорость до 50 м/с и более. Для предгорного участка Платово-Подгорное, где поток при выходе на равнину уже распластывался, скорость уже определена 16 м/с, а глубина потока около 60 м. Основой для этих расчетов являлись «знаки гигантской ряби», а также поперечные профили р. Чуя и вычисленный объем Чуйского и Курайского палеозер по отметкам террас. Методы расчета и результаты отличаются у разных авторов, что детально рассмотрено в [15], но очевидно единственное – если гигантские палеозера межгорных котловин опорожнялись, то суперпаводки были в состоянии переотлагать гигантские объемы обломочного материала.

Для сравнения можно привести примеры. Так, сель 9 апреля 2000 г. в горах Тибета перенес около 300 млн. м³ материала и образовал дамбу высотой 130 м, длиной 2.6 км поперек долины р. Йигонгзангбу, за которой сформировалось подпрудное озеро. После прорыва этой дамбы «прорывной паводок объемом около 3 млн. м³ прошел около 70 км вниз по реке, причем скорость прорывной волны доходила до 124 м/с.» [19, стр. 30]. Прорывные паводки оз. Тальсеква начала XX века на границе Аляски и Канады достигали объема 907 км³ [7]. Натурные наблюдения за реально происходившими явлениями показывают, что для геологических построений не очень важны различия в скоростях и расходах гигантских прорывных паводков, а также в объемах перемещаемого материала (все эти параметры достаточно велики), но крайне важен вопрос их принципиальной возможности в конкретных условиях.

Именно для ответа на этот вопрос было проведено геоинформационное моделирование (на основе ЦМР по SRTM с использованием ARCGIS), результаты которого отражены на рис. 1. Моделирование подтопления проводилось на основе цифровых моделей рельефа (по радарным данным SRTM). С использованием ArcGis 9.3 был подсчитан объем воды ниже уровня 2200 м для Чуйской котловины и ниже уровня 2100 м для Курайской (рис. 2). Эти уровни определялись исходя из береговых абразионных террас палеозер, которые картографировались с использованием GPS и наносились на крупномасштабные карты [10, 17, 18]. С учетом постседиментационных неотектонических подвижек был выбран минимальный по высоте абсолютных отметок вариант. Для Чуйской впадины объем воды ниже изолинии с отметкой 2200 м составил 837.89 км³. Для Курайской котловины объем воды ниже изолинии с отметкой 2100 м составил 229.21 км³.

Кроме того, проводилось моделирование объема воды при затоплении равнинной территории от Горно-Алтайска до Камень-на-Оби. Этот участок долины верхней Оби – нижней Катуня был разбит на 3 участка и объем воды рассчитывался для каждого из них отдельно. На южный участок объем воды составил 604.85 км³, на средний – 93.35 км³ и на северный – 357.7 км³ (см. рис. 3 и таблицу).

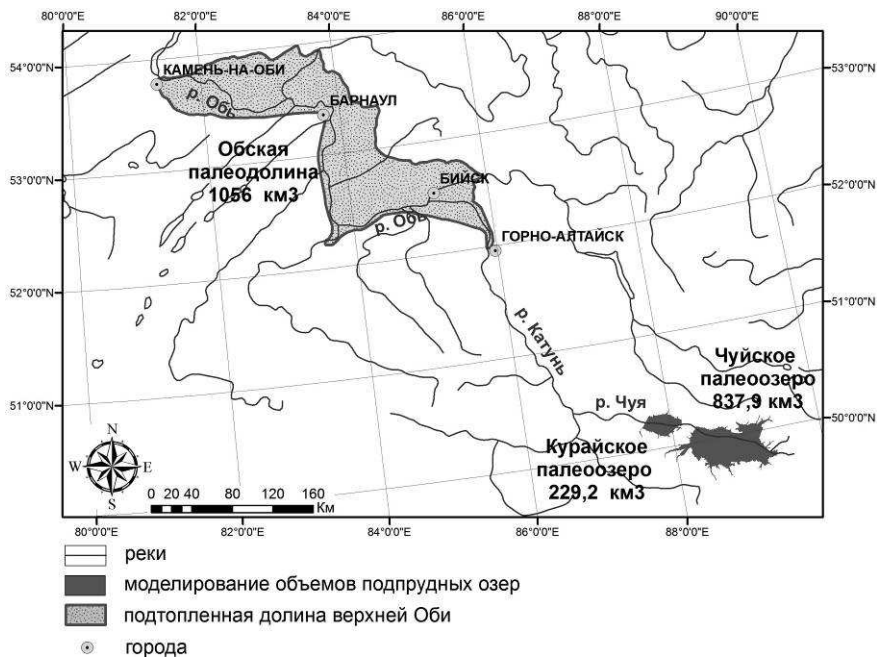


Рис. 1. ГИС-моделирование объемов подтопления долины верхней Оби.

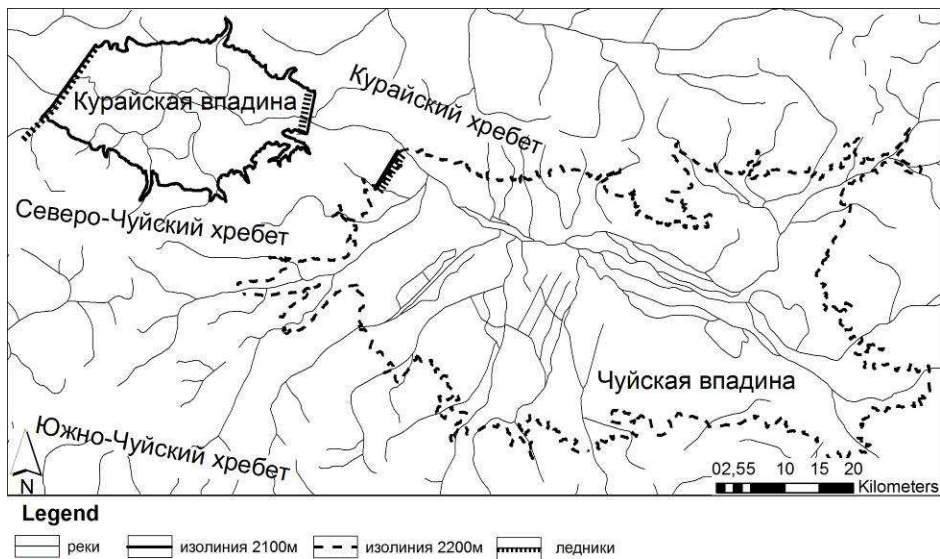


Рис. 2. Подпружно-ледниковые озера Чуйской и Курайской котловин, реконструированные по береговым абразионным уступам.

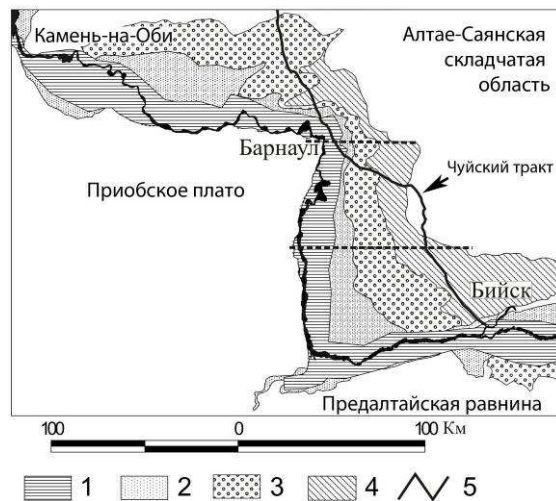


Рис. 3. Моделирование подтопления равнинной части (1 – пойма, 2 – I-III надпойменные террасы, 3 – IV-я надпойменная терраса, 4 – V-я надпойменная терраса, 5 – геоморфологические уступы).

Таблица. Объемы воды в озерах и на подтопленной части равнины.

Источник		Объем, км ³
Чуйское и Курайское озера		1067.09
Подтопление на равнине		1055.9
	Южный участок	604.85
	Средний участок	93.35
	Северный участок	357.7

Объем воды оказался сопоставимым: 1055 км³ – в палеодолине верхней Оби и 1067 км³ в палеоозерах Чуйской и Курайской котловин. Эти расчеты, выполненные по стандартной методике, исключают возможность выдвижения гипотез о том, что объема воды в Чуйско-Курайской лимносистеме не хватало для аномально высокого подтопления долины р. Обь или, что воды гигантских паводков при выходе из гор распластывались по равнине. Суперпаводкам просто некуда было распластываться. Вода из Обской долины могла уходить только в межувальные ложбины левобережья и вниз по течению Оби в сужение у Камень-на-Оби. Раскрытие магистральной долины в низменность происходит уже севернее устья р.Томь. Именно в этом участке и «смыкается» Обской веер террас, переходя в плоскую поверхность. Данная поверхность и отражает процесс «распластывания», а не уровень стояния сартанского мансийского ледниково-подпрудного палеоозера, как это считалось ранее. Таким образом, подтверждена принципиальная возможность подтопления долины нижней Катунь – верхней Оби водами гигантских гляциальных паводков, прорывавшихся через ледниковые плотины из котловин Горного Алтая.

В связи с вышеизложенным интересны геоморфологические исследования в области предполагаемого стока суперпаводков из долины Оби на Обь-Иртышское междуречье по межувальным ложбинам. В ходе экспедиционных работ на территории Кулунды и Барабы [9] неоднократно фиксировались наземными наблюдениями береговые линии древних ложбин стока, обрамляющие цепочки озер в линейных понижениях рельефа. Эти береговые линии выражаются береговыми валами, сложенными косослоистым песком, которые впоследствии с поверхности были перевезены на разную глубину. Современные озера также группируются в линейно-вытянутые серии, приуроченные к осям древних ложбин стока. Здесь явственно прослеживаются цепочки озер, которые выстраиваются в линейные структуры. Видно, что современные реки расположены на продолжении цепочек озер, в других случаях озера как бы насажены бусинками на реки, образуя четко видимые расширения их русел. Таким образом, вся гидросеть (и реки и озера) наследует палеорельеф, располагаясь в древних ложбинах стока, проходящих насквозь через Кулундинско-Барабинскую низменность. Интересными являются и закономерности распределения грив. Традиционно на Обь-Иртышском низменном междуречье выделяется два типа грив: продольные и поперечные основным направлениям ветров на юге Западно-Сибирской равнины. При анализе цифровой модели рельефа (полученной на основе радарных данных SRTM) было выявлено, что сгущения плотности распределения грив формируют полосы, параллельные полосам, которые формируют сгущения распределения озер. Такая ориентировка обусловлена тем, что песчаный материал, который использовался ветром для перевезения и формирования грив, изначально был отложен (аккумулирован) теми же потоками, что и выработали в низменности серии линейных понижений.

По цифровым моделям рельефа, детально дифференцированным на дробные гипсометрические интервалы, по схемам азимутов падения и углов падения склонов, по теневым моделям рельефа и схемам густоты распределения гидросети и грив, была построена схема (рис. 4), на которой показаны оси сквозных ложбин стока от Оби к Иртышу через низменное междуречье, а также оси разделяющих их увалообразных повышений рельефа. Примечательно, что ложбины прослеживаются не только в пределах Приобского плато, где они разделены увалами, но и через все междуречье вплоть до Прииртышского вала, где они местами ориентированы вдоль него, а в некоторых участках прорывают его в долину р. Иртыш. На водоразделе Оби и Иртыша согласно данным геологической съемки [5] в широких погребенных долинах и котловинах распространены песчаные, супесчаные и суглинистые отложения карасукской свиты мощностью около 10 м (в озерных переуглублениях в несколько раз больше).

Верхнечетвертичные палеоруслы, впадавшие в Иртыш и бравшие начало на территории Приобского плато, фактически от современной долины Оби, прослежены по пескам, гравийникам, и реже галечникам, вскрытым бурением [4]. Несостоятельность неотектонических концепций, объяснявших увало-ложбинное строение Обь-Иртышского междуречья, убедительно показана в [12]. Разрушиванием установлена инверсия современного рельефа и кровли фундамента. Порозихинская, Алейская, Барнаулкинская, Касмалинская, Кулундинские ложины выстланы погребенными песками с окатышами в основании и алевритами в кровле. Касмалинская свита, сопоставляемая с нижним ярусом IV надпойменной террасы Оби, составляет по мощности от 5 до 50 м и, выполняя палеодолины, пересекающие Приобское плато, представлена мелко-средне зернистыми полимиктовыми песками с прослоями иловатых суглинков [8]. По анализу фактического материала геологических карт, научных

публикаций и по полевым наблюдениям авторов отложения суперпаводков на Обь-Иртышском междуречье становятся мелкими по гранулометрическому составу. Их базальные слои представлены уже не валунно-глыбовниками и даже не галечниками, а гравийниками с окатышами глин и разнозернистыми песками. Большие мощности песчаных отложений в палеодолинах позволяют с уверенностью говорить о суперпаводковом их происхождении. Эти мощности на несколько порядков превышают транспортирующую и аккумуляционную способность современных рек, протекающих по междувальным ложбинам и далее по Кулундинско-Барабинским выровненным низменностям. Ни неотектонические, ни климатические факторы не могут объяснить ни аномальной ширины палеодолин Обь-Иртышского междуречья, ни аномальной мощности флювиальных отложений, погребенных в этих палеодолинах. Единственным адекватным объяснением представляются катастрофические паводки.

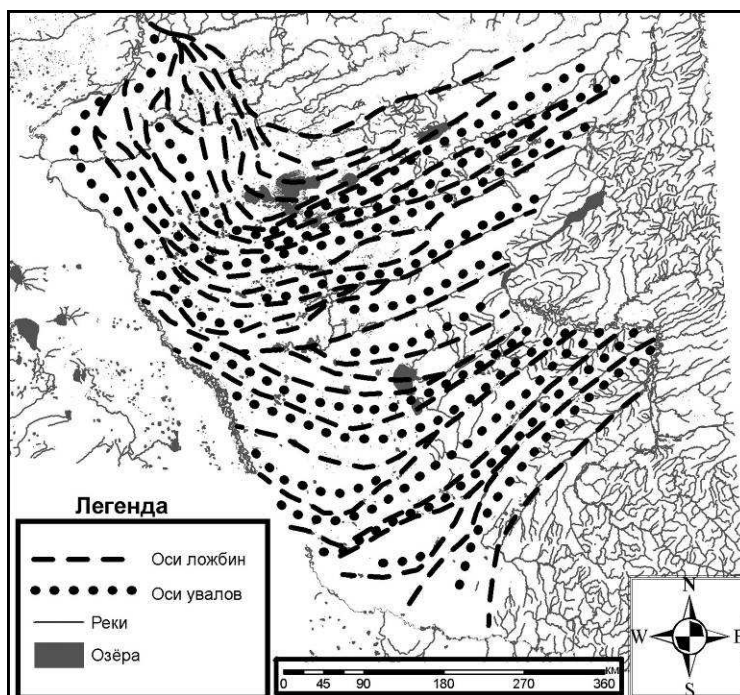


Рис. 4. Реконструкция древних ложбин стока и разделяющих их возвышенностей.

Таким образом, расчеты, выполненные по стандартной методике с использованием цифровых моделей рельефа SRTM, исключают возможность выдвижения гипотез о том, что объема воды в Чуйско-Курайской лимносистеме не хватало для аномально высокого подтопления долины р. Обь или, что воды гигантских паводков при выходе из гор распластывались по равнине. Геоинформационным моделированием подтверждена принципиальная возможность подтопления долины нижней Катунь – верхней Оби водами гигантских гляциальных паводков, прорывавшихся через ледниковые плотины из котловин Горного Алтая. Вероятно, сначала бассейн верхней Оби катастрофически затоплялся суперпаводком, а затем это кратковременно возникшее озеро очень быстро (в течение нескольких суток) осушалось через узкую горловину у Камень-на-Оби, а также через левобережные ложбины стока между увалами.

Литература

1. Carling P.A. Morphology, sedimentology and paleohydraulic significance of large gravel dunes, Altai Mountains, Siberia // *Sedimentology*. 1996. Vol. 43. P. 647-664.
2. Herget J., Reconstruction of ice-dammed lake outburst floods in the Altai Mountains, Siberia / A review // *Geological Society of India*. 2004. Vol. 64. P. 561-574.
3. Herget J. Reconstruction of Pleistocene ice-dammed lake outburst floods in the Altai Mountains, Siberia // *Geological Society of America*. 2005. Special papers № 386. 118 p.
4. Адаменко О.М. Предалтайская впадина и проблемы формирования предгорных опусканий. Новосибирск: Наука, 1976. 182 с.
5. Алескерова З.Т., Антыпко Б.Е., Боровиков Л.И. и др. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:1 000 000. Лист N-43 (Омск). Объяснительная записка. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 265 с.
6. Бутвиловский В.В. Палеогеография последнего оледенения и голоцена Алтая: событийно-катастрофическая модель. Томск: Изд-во ТГУ, 1993. 252 с.
7. Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
8. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист N-(44),45. Объяснительная записка. Ленинград: ВСЕГЕИ, 1988. 134 с.

9. Зольников И.Д. Гляциогенно обусловленные суперпаводки неоплейстоцена Горного Алтая и их связь с историей формирования отложений и рельефа Западно-Сибирской равнины // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2009. № 69. С. 59-70.
10. Зольников И.Д., Деев Е.В., Лямина В.А. Новые данные о четвертичном морфолитогенезе в Чуйской котловине (Горный Алтай) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 4. С. 437-449.
11. Зольников И.Д., Глушкова Н.В., Лямина В.А. и др. Индикация динамики природно-территориальных комплексов юга Западной Сибири в связи с изменениями климата // География и природные ресурсы. 2011. №2. С. 155-160.
12. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. Томск: Изд-во ТГУ, 2008. 288 с.
13. Парначев С.В. Геология высоких алтайских террас (Яломанско-Катунская зона). Томск: Изд-во ИПФ ТПУ, 1999. 137 с.
14. Рудой А.Н. Гигантская рябь течения (история исследований, диагностика, палеогеографическое значение). Томск: Изд-во ТГПУ, 2005. 224 с.
15. Рудой А.Н., Земцов В.А. Моделирование гидравлических характеристик дилuviальных потоков из позднечетвертичного Чуйско-Курайского ледниково-подпрудного озера // Лед и снег. 2010. № 1 (109). С. 111-118.
16. Русанов Г.Г. Озера и палеогеография Северного Алтая в позднем неоплейстоцене и голоцене. Бийск: Бийский пед. гос. ун-т им. В.М. Шукшина, 2007. 164 с.
17. Русанов Г.Г. Отложения позднеюрмскоголедникового комплекса в бассейне Верхней Коксы (Горный Алтай) // Известия Бийского отделения РГО. Вып. 29. Бийск: БПГУ, 2008. С. 26-30.
18. Русанов Г.Г. Максимальный уровень Чуйского ледниково-подпрудного озера в Горном Алтае // Геоморфология. 2008. № 1. С. 65-71.
19. Черноморец С.С. Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 184 с.

Физическое моделирование возникновения и распространения торфяных пожаров

А.М. Гришин, В.Т. Кузнецов, В.П. Зима, Д.П. Касымов

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Торфяные пожары, как и другие типы пожаров, представляют большую опасность для жизнедеятельности человека, что подтверждают трагические события лета 2010 года в Европейской части России. Последствия торфяных пожаров отмечаются до настоящего времени, где, несмотря на зиму, до сих пор идет горение торфяника. Как правило, торфяники горят в засушливый период времени и могут возникать в результате действия низового лесного пожара. Целью настоящей работы является моделирование процесса перехода загорания и горения торфа в лабораторных условиях от горящего опада лесных горючих материалов. В работе дается краткое описание экспериментальной установки, подробная схема проведения серий экспериментов, анализ результатов экспериментальных исследований. Исследования проводились в лабораторных условиях на установке по исследованию лесных, степных и торфяных пожаров, на которую был получен патент [1]. Испытательный комплекс представляет собой короб – полигон для изучения загорания торфа и моделирования торфяных пожаров (см. рис. 1). Размер короба – полигона 1.5×1.5×0.3 м.

Имеется комплекс измерительного оборудования; автоматизированная система сбора регистрации данных на базе компьютера, трех пятиканальных АЦП с ХА термодатчиками. Программа регистрации входных данных разработана на базе программного комплекса Labview. Влажность торфа определяется при помощи анализатора влажности AWDHX – 50 с точностью до 0.01%. Масса образцов определялась с помощью электронных весов AWDHL – 400 с точностью 0.1 г. Поджиг лесных горючих материалов (ЛГМ) осуществлялся с помощью линейного источника загорания в виде спирали. Также измерения проводились с помощью тепловизора JADE J530SB с матрицей 320×240 пикселей, диапазон измеряемых температур -15...+1500 °С. Тепловизор укомплектован объективами 25 мм, 50 мм, 200 мм.

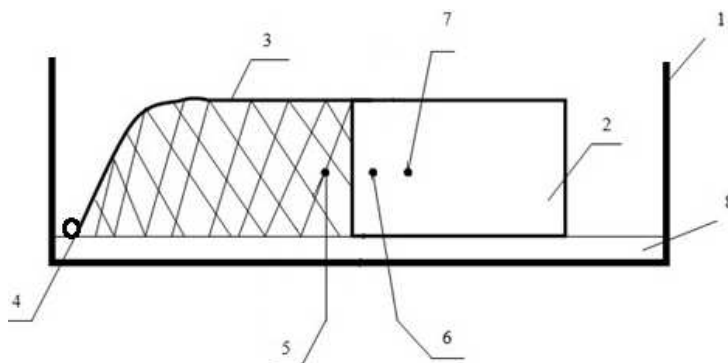


Рис. 1. Схема проведения эксперимента. 1 – металлический короб – полигон; 2 – образец торфа, $W = 1\%$; 3 – лесной горючий материал (ЛГМ); 4 – источник загорания; 5 – термопара в слое ЛГМ; 6 – термопара у поверхности торфа; 7 – термопара внутри слоя торфа; 8 – подложка из грунта.

Подготовка к экспериментам проходила в следующей последовательности (см. рис. 1). На дно металлического короба 1 укладывается образец торфа 2 с размерами $(0.08 \times 0.065 \times 0.05) \cdot \text{м}^3$. Ниже приведена таблица, содержащая информацию о ботаническом составе образца.

В этом образце устанавливались термопары: одна в приповерхностном слое ближе к ЛГМ – 3, другая на оси внутри образца торфа 2 на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м от первой. К образцу торфа 2 примыкал слой ЛГМ массой $10 \cdot 10^{-3}$ кг. В этом слое на границе с образцом торфа 2 устанавливалась также термопара 5. Слой ЛГМ поджигался источником 4.

Таблица. Ботанический состав и характеристика образцов торфа.

№ обр.	Тип торфа	h , м.	Состав растительных остатков	Содержание, %	R , %	Зольность, %
1	Тростяно-сфагновый переходный	0-0.35	Кора и древесина сосны	25	35	7.5
			Кора и древесина березы	5		
			Кора карликовой березки	10		
			Пушица	30		
			Осока волосистоплодная	10		
			Хвощ	5		
			Сфагнум магелланский	10		
			Сфагнум центральный	5		

Также рассматривалась другая серия экспериментов, в которой исследовалось влияние низового лесного пожара на образец торфа, заглубленный в почву (см. рис. 2). Схема в точности повторяла предыдущую, но в образце торфа устанавливалось уже четыре термопары: в приповерхностном слое ближе к ЛГМ – 3, одна на оси внутри слоя торфа на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м – 4, одна на оси на расстоянии $2 \cdot 10^{-2}$ м, также устанавливалась еще термопара ближе к ЛГМ, но смещенная от термопары 3 вниз на $1 \cdot 10^{-2}$ м, чтобы проанализировать заглубление горения в торфе – 6. Зажигание осуществлялось с помощью точечного источника:

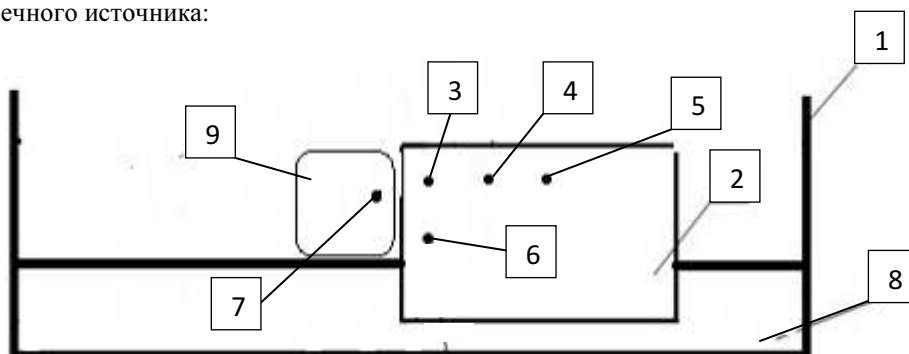


Рис. 2. Вторая схема проведения эксперимента (вид сбоку). 1 – металлический короб – полигон; 2 – образец торфа, $W=5,55\%$ (рис 10), $W=43,8$ (рис. 10); 3,4,5,6 – термопары в образце торфа; 7 – термопара в слое ЛГМ; 8 – подложка из грунта; 9 – слой ЛГМ.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Первые результаты экспериментальных исследований перехода горения ЛГМ от низового лесного пожара в торф приведены на рис. 3 (соответствуют первой схеме проведения серии экспериментов).

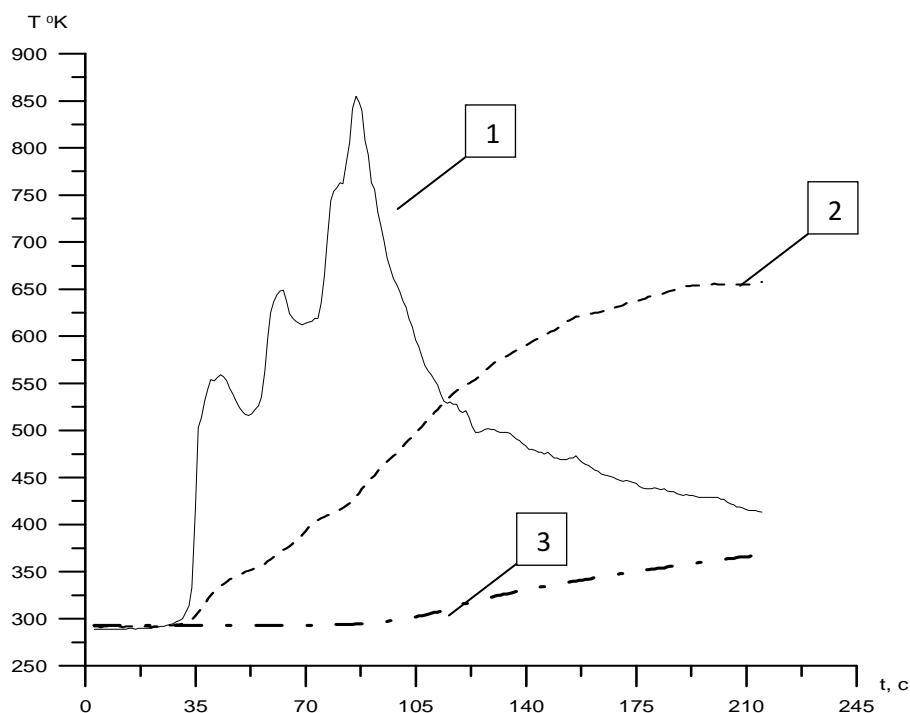


Рис. 3. Зависимости изменения температуры от времени: 1 – изменение температуры в ЛГМ; 2 – изменение температуры в пристеночном слое торфа; 3 – изменение температуры в массе торфа.

Графики на рис. 4 соответствуют экспериментам, проведенным по второй схеме, с учетом заглубления и варьирования влагосодержания образца торфа.

Здесь представлена типичная зависимость изменения температуры от времени для серии опытов. Сплошная линия характеризует изменение температуры в слое ЛГМ. Пунктирная – в пристеночном слое торфа, штрих-пунктирная – изменение температуры в образце торфа на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м от термопары, находящейся в пристеночном слое (см. рис. 3). В опытах влагосодержание в образцах торфа составляло $W = 1\%$. Размещения термопар в слое ЛГМ позволяло определить переход горения от ЛГМ к торфу и изменение температуры (сплошная линия) являлось реперной точкой, от которой начинался отсчет времени зажигания образца торфа. Видно, что нарастание температуры в пристеночном слое образца торфа идет с запаздыванием порядка 10 с. Скорость тления образца торфа на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м между термопарами составляет ориентировочно 0.19 мм/с.

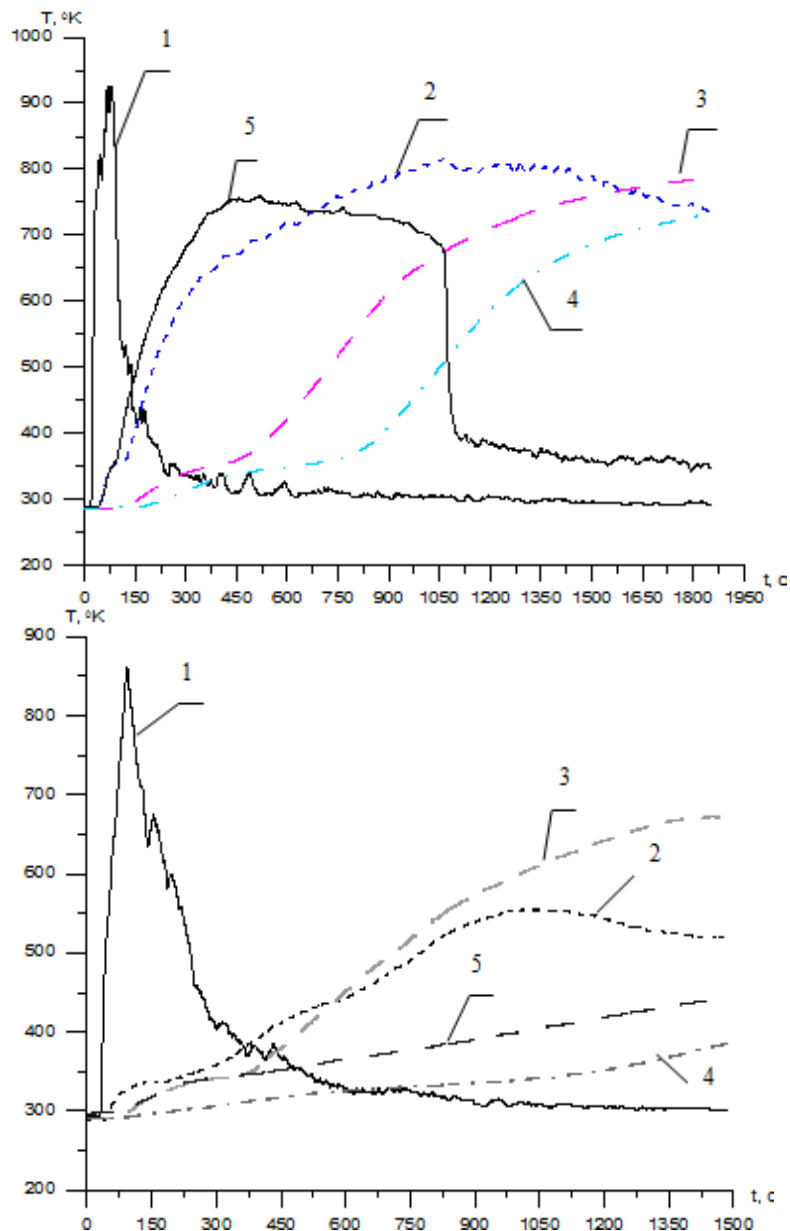


Рис. 4. Зависимости изменения температуры от времени: 1 – температура в слое ЛГМ, 2 – изменения температуры в пристеночном слое торфа, 3 – изменение температуры на оси внутри слоя торфа на расстоянии $1 \cdot 10^{-2}$ м от термопары 3 (см. рис. 2), 4 – изменение температуры на оси внутри торфа на расстоянии $2 \cdot 10^{-2}$ м, 5 – изменение температуры в нижней части массы торфа.

Чтобы проанализировать влияние влагосодержания образца торфа на скорость перехода фронта пожара от ЛГМ в торф, во второй серии опытов были взяты идентичные по своему ботаническому составу, но имеющие разное влагосодержание, образцы. На рисунке 4 показана зависимость изменения температуры от времени в случае влагосодержания $W = 5.55\%$. Видно, что как и в первой серии опытов (рис. 3), нарастание температуры в пристеночном слое образца торфа идет с запаздыванием порядка 10 с. Положение термопары 6 (см. рис 2) позволяет увидеть, что горение в массе торфа с первых секунд начинает уходить вглубь, при этом распространяясь и вдоль по оси.

Рис. 4 (внизу) характеризует изменение температуры от времени в случае, когда влагосодержание образца торфа $W = 43.8\%$. На графике хорошо видно, что переход горения от ЛГМ в торф идет значительно медленнее. Также не наблюдается явное заглублиение горения в массе торфа. В данном случае горение носило очаговый характер, что согласуется с данными работ [2, 3].

Была получена тепловизионная картина перехода горения ЛГМ в торф. Хорошо видно, что наблюдается устойчивое горение торфа. Фронт горения постепенно уходит вглубь образца. Рис. 5 относится к первой схеме проведения эксперимента, когда образец торфа не укапывался вглубь земли.

Для определения и исследования поля температур на поверхности торфа была выбрана область 1 (см. рис. 5). С помощью программного обеспечения, используемого при работе с тепловизором, был получен график распределения максимальной, минимальной и средней температуры в выбранной области 1, представленный на рис. 5.

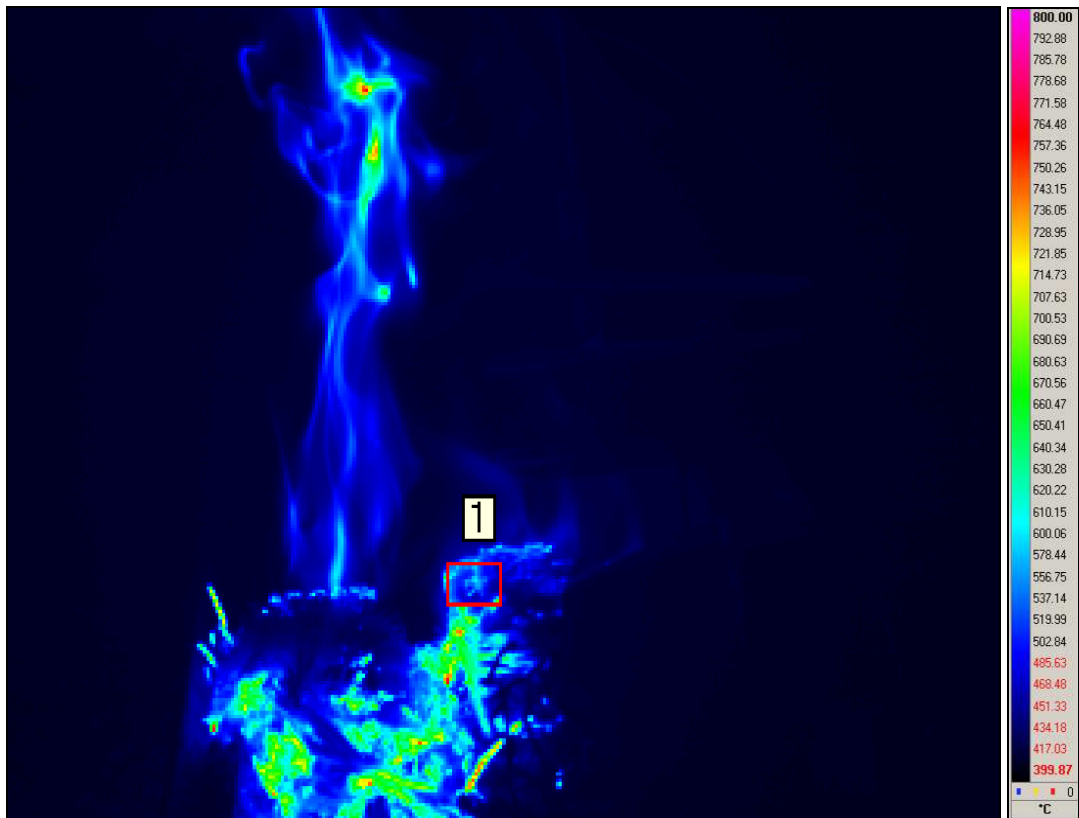


Рис. 5. Тепловизионная картина проведения эксперимента.

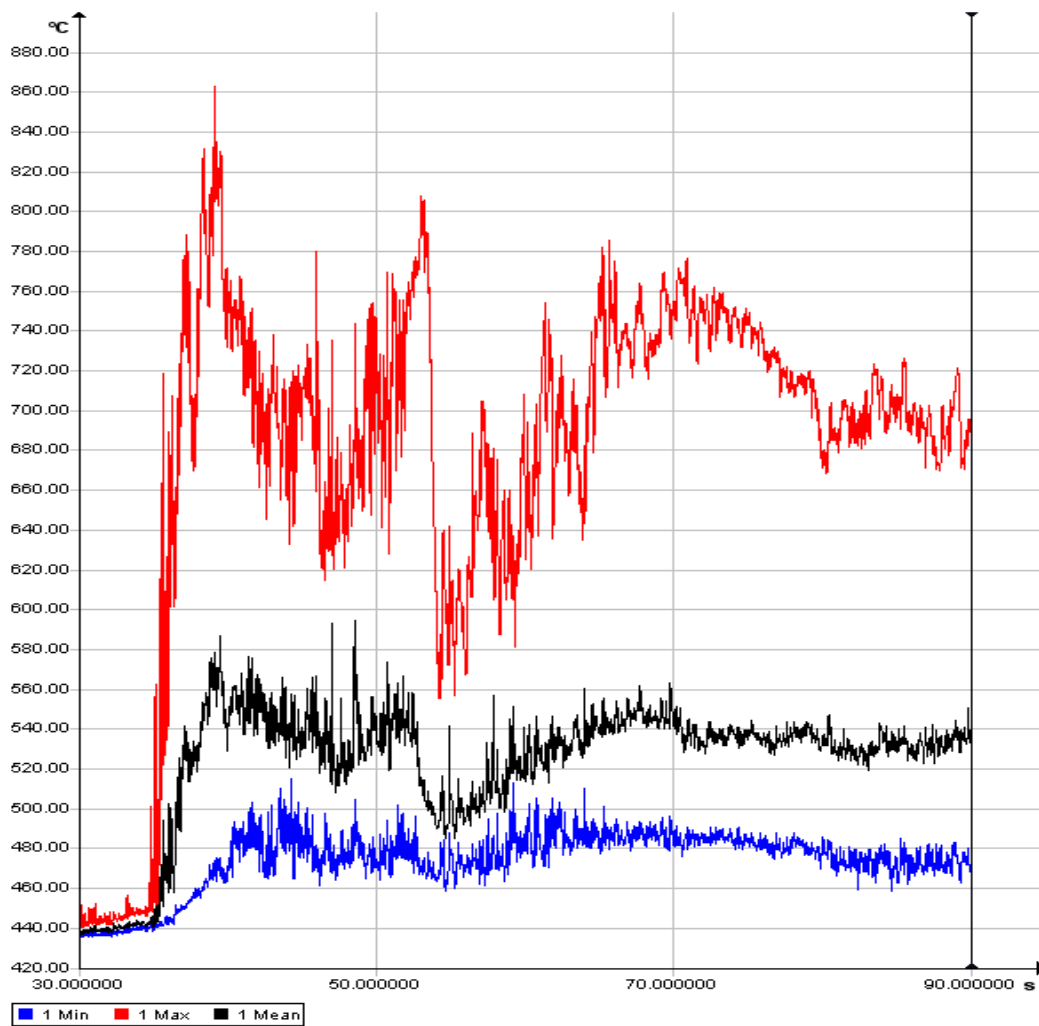


Рис. 6 Изменение температуры от времени в области 1.

Как видно из графика, скачки максимальной температуры на поверхности образца вызваны влиянием пламени при сгорании ЛГМ. Наименьшие пульсации имеет минимальное значение температуры, что говорит о том, что эти данные наиболее достоверно отражают температурную картину в очаге горения торфа. Минимальная температура равна 689.58 К.

Для того чтобы точнее оценить температуру горения торфа, рассматривалась область 2 образца в момент времени, когда горение ЛГМ прекратилось и не искажало тепловую картину в самом торфе, который, в свою очередь, в этот момент уже горел (см. рис. 7). Получены следующие температуры $T_{\text{мин}} = 629.7 \text{ К}$, $T_{\text{ср}} = 654.4 \text{ К}$, $T_{\text{макс}} = 678.8 \text{ К}$.

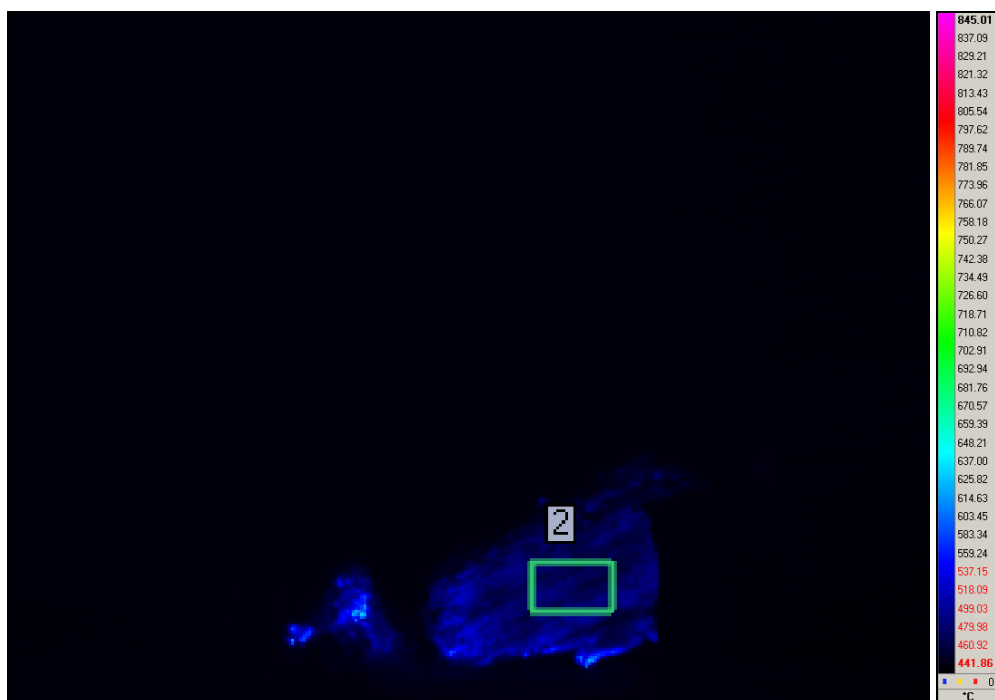


Рис. 7. Тепловизионная картина горения торфа вследствие действия низового лесного пожара.

Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с работой [4] Борисова А.А., в которых, на основе экспериментального и математического моделирования торфяных пожаров, максимальная температура горения торфа изменяется в пределах $673 \text{ К} \leq T_f \leq 623 \text{ К}$.

Выводы:

1. Подготовлена установка для изучения возникновения и распространения торфяных пожаров.
2. Проведены две серии экспериментов, в которых варьировалось влагосодержание образца торфа и запас ЛГМ.
3. Отмечено, что скорость горения вершинного торфа имеет значения порядка 0.19 мм/с.
4. Показано, что результаты расчетов по величине скорости тления торфа согласуются с экспериментальными данными [44, 46].
5. Установлено, что с ростом объемной доли влаги время зажигания реагента увеличивается.
6. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-01-00673-а, проект № 10-01-91054-НЦНИ_а).

Литература

1. Гришин А.М., Зима В.П., Кузнецов В.Т., Фильков А.И. Испытательный комплекс для моделирования лесных, степных и торфяных пожаров // Патент на изобретение № 237/220. 3-ка № 2008/17660 от 04.05 2008, опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30.
2. Reardon J., Hungerford R., Ryan K. Factors affecting sustained smouldering in organic soils from pocosin and pond pine woodland wetlands // International Journal of Wildland Fire. 2007. N.16. P. 107-118.
3. Ohlemiller T. J. Smoldering Combustion // SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 3rd ed. Massachusetts, 2002. P. 2.200-2.210.
4. Борисов А.А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. и др. Экспериментальное исследование и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск, 1984. С. 5-22.

Применение методов численного анализа для решения задач экологического мониторинга качества воды в водоемах

Е. А. Калинина, И.С. Вахитов

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

Экологическая проблема – одна из самых острых, глобальных проблем современности. Пренебрежение экологическими неприятностями из-за недостатка знаний и отсутствия экологической и нравственной культуры – одна из причин экологического кризиса в нашей стране, еще более усугубляющегося недостатком средств для охраны окружающей среды от загрязнения. Наиболее уязвимой в экологическом плане частью природы оказалась вода.

Это делает актуальным вопрос об организации мер по геоэкологическому мониторингу рек, озер, морей и всего океана в целом средствами геоинформационных систем с привлечением методов экологического моделирования и дистанционного зондирования. Основными целями такого мониторинга должны стать контроль уровня и характера загрязнений, управления водоподачей в них, предотвращения цветения и масштабов их хозяйственного использования.

Решение задач защиты окружающей среды от выбросов вредных примесей приводит к необходимости решения математическими методами задач обнаружения неизвестных источников примесей и идентификации их параметров. Применение метода математического моделирования к исследованию процессов распространения загрязняющих веществ в природных водоемах приводит к необходимости решения начально-краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих распространение загрязнений в рассматриваемых областях. Указанные краевые задачи содержат ряд термодинамических, биохимических и других параметров, а также функции, описывающие плотности источников загрязнения. Для того чтобы однозначно определить решение соответствующей краевой задачи, адекватно описывающей рассматриваемый процесс, значения всех входных параметров, начальных и граничных функций, а также плотности граничных и распределенных источников должны быть известны.

Однако на практике часто возникают ситуации, когда некоторые из указанных параметров или плотностей источников неизвестны. В этих случаях приходится наряду с искомым решением рассматриваемой краевой задачи отыскивать и неизвестные плотности источников либо параметры, используя некоторую дополнительную информацию о решении.

Приведенные примеры являются примерами так называемых задач идентификации для моделей распространения загрязнений в природных средах. По своей постановке указанные задачи относятся к классу обратных задач, поскольку в них необходимо восстановить причину воздействия по заданному следствию. Теоретическому и численному анализу обратных задач для моделей распространения загрязнений посвящены работы Г.В. Алексеева и его учеников [1-9].

В настоящей работе проводится исследование некоторых задач прогноза экологического состояния атмосферы и океана на основе методов математического моделирования, которые сводятся к решению начально-краевых задач для уравнений, описывающих распространение и трансформацию примеси в изучаемой области. По своей постановке указанные задачи относятся к классу обратных задач. В строгой математической формулировке они заключаются в нахождении параметров неизвестного источника примеси по измеренной информации о поле концентраций, создаваемом этим источником в некоторой области, а также по определенной информации об источнике.

В частности, нами проведено численное исследование обратной экстремальной задачи идентификации младшего коэффициента двумерного эллиптического уравнения конвекции-диффузии-реакции в ограниченной области по дополнительным измерениям в некоторой подобласти. Остановимся на этой задаче подробнее.

В ограниченной области Ω в R^2 или R^3 с гладкой границей Γ рассматривается задача нахождения концентрации примеси φ из соотношений:

$$-\lambda \Delta \varphi + \mathbf{u} \Delta \varphi + \kappa \varphi = f, \quad \varphi|_{\Gamma} = \phi.$$

Здесь $\lambda = \text{const} > 0$ – коэффициент диффузии, $\mathbf{u} = (u, v)$ – вектор скорости, $\kappa \geq 0$ – величина, характеризующая распад загрязняющего вещества за счет химических реакций, f – плотность объемных источников, ϕ – заданная на Γ функция.

В рассматриваемой задаче неизвестным помимо концентрации примеси φ является и коэффициент κ , описывающий распад загрязняющего вещества за счет химических реакций. В качестве дополнительной информации о решении используются значения ϕ_d концентрации φ , которые соответствуют заданию поля концентрации, создаваемом источником в некоторой подобласти $Q \subset \Omega$.

Решение указанной задачи сводится к экстремальной задаче при некотором выборе функционала качества с управлением κ . В работе исследуется разрешимость рассматриваемой экстремальной задачи, обосновывается применение принципа неопределенных множителей Лагранжа. На основе последнего

выводится и анализируется система оптимальности для функционала качества $J(\phi, \kappa) = \frac{\mu_0}{2} \|\phi - \phi_d\|_Q^2 + \frac{\mu}{2} \|\kappa\|^2$, где μ_0, μ – неотрицательные константы. Также развиваются и реализовываются 2 вычислительных алгоритма. Первый из них основан на применении градиентного метода для приближенного решения этой обратной задачи, а второй – на алгоритме Ньютона. Проводится серия вычислительных экспериментов. Анализ которых позволил сделать вывод о том, что, во-первых, с уменьшением значения μ точность восстановления коэффициента κ улучшается, во-вторых, значение оптимального параметра κ зависит от шага сетки, на которой производится расчет. В работе показывается, что существенное влияние на качество восстановления оказывает выбор начального приближения, шаг сетки и число Пекле. В частности, с ростом последнего качество восстановления ухудшается. Тем не менее, во всех исследуемых случаях наблюдалась сходимость итерационного процесса, хотя и за разное число итераций, которое существенно зависит от выбора начального приближения. Оно тем больше, чем «хуже» (для заданной функции κ_T) начальное приближение. Заметим также, что сходимость наблюдается быстрее при использовании 2-го алгоритма. Отметим также, что точность восстановления коэффициента κ значительно возрастает с уменьшением погрешности δ , определяющей неточность измеренной концентрации примеси ϕ , заданной в области Q .

В настоящей работе проводится также численное исследование обратной задачи идентификации временной компоненты плотности неизвестного источника примеси для двумерного уравнения конвекции – диффузии при заданной пространственной компоненте указанного источника. В частности, рассматривается уравнение

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + \gamma c - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} = f(x, y, t),$$

где u, v – компоненты вектора скорости; величина γ , характеризующая скорость протекания химической реакции и коэффициент диффузии D постоянны в прямоугольной области $\Pi = \{(x, y) : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$.

На границе Γ прямоугольника Π заданы однородные граничные условия первого рода: $c(x, y, t)|_{\Gamma} = 0$. Кроме того, задано однородное начальное условие: $c(x, y, 0) = 0$.

Обратная задача состоит в нахождении функции $f(x, y, t)$ по данным наблюдения концентрации $c(x, y, t)$ в некоторой ограниченной области. В общем случае эта задача может иметь более одного решения, однако, в некоторых частных случаях, например, когда $f(x, y, t) = \eta(t)\phi(x, y)$, где $\phi(x, y)$ – известная функция (носитель источника), единственность восстановления временной компоненты $\eta(t)$ может быть обеспечена [10]. Плотность источника восстанавливается по дополнительному наблюдению за концентрацией $c(x, y, t)$ некоторых внутренних точках $0 < x^* < 1, 0 < y^* < 1 : c(x^*, y^*, t) = \phi(t)$.

Развивается вычислительный алгоритм, основанный на сведении рассматриваемой обратной задачи к вспомогательной задаче для нагруженного параболического уравнения. Указанное уравнение впервые было описано в работе [13].

В результате чего рассматриваемая задача сводится к численному решению 2-х прямых задач на каждом временном слое. Для дискретизации которых используется схема Кранка-Николсона, имеющая второй порядок по времени и пространству, а также схемы Chawla [14] 3-5-го порядка точности.

В ходе вычислительных экспериментов было проведено исследование зависимости восстановления правой части уравнения конвекции – диффузии от исходных коэффициентов. В результате которого установлено, что наибольшее влияние оказывает первый компонент вектора скорости, с ростом которого, точность восстановления падает. Кроме того, на качество восстановления существенно влияет выбор точки наблюдения. В частности, чем ближе к центру области расположена точка наблюдения, тем точнее будет результат. Кроме того, на точность восстановления оказывает влияние и вид плотности источника по пространству. Из проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что точку наблюдения удобнее располагать правее области, в которой расположен максимум функции ψ . В рассматриваемой задаче также сохраняется ухудшение результатов с ростом числа Пекле. Тем не менее, достичь сходимости предложенного алгоритма удалось во всех рассматриваемых случаях, в результате чего, можно сделать вывод об эффективности предложенного алгоритма.

Кроме того, в настоящее время разработано множество разнообразных моделей качества воды, QUAL2K (Q2K) – одна из них. Модель предназначена для моделирования качества воды в реках, каналах, хорошо перемешанных озерах. Она позволяет промоделировать главные реакции питательных циклов, поведение водорослей, бентоса, микроорганизмов, рН фактор и др., учитывает происходящие в реке кинетические процессы, включающие в себя, растворение, гидролиз, окисление, нитрификацию, денитрификацию, фотосинтез, смертность и дыхание живых организмов, а также, происходящие в реке

массо-транспортные процессы, включающие реарацию, оседание, поток неорганического углерода из осадка. Q2K разбивает рассматриваемый участок реки на сегменты. Притоки реки не моделируются явно, но могут быть представлены как точечные источники. В качестве начальных данных модель использует пробы воды, взятые непосредственно в реке, которые Q2K усредняет так, чтобы были созданы гладкие участки между рассматриваемыми точками взятия проб. Q2K позволяет промоделировать качество воды в точке, расположенной ниже по течению от действующих источников сброса с предприятий в реку, ежечасно в течение моделируемых суток. Все происходящие в реке процессы реализованы в систему одномерных уравнений, для решения которой Q2K использует итерационный метод.

В настоящей работе покажем применение указанной модели для мониторинга экологического состояния рек Комаровка, Раковка и Раздольная, протекающих в Уссурийском районе Приморского края.

При большой плотности вредных производств, в г. Уссурийске высок предельный вес промышленных предприятий с устаревшим оборудованием, отсутствием очистных сооружений, значительным выбросом в окружающую среду различных техногенных отходов. В течение года в реки сбрасывается около 200 т легкоокисляемых органических веществ, 400 т нитратного азота, 50 т аммонийного азота, 10 т нитритного азота, соединений железа и фосфатов, 5 т жиров, танина и соединений алюминия.

Помимо специфического вредного влияния, которое оказывают различные индивидуальные вещества вследствие их токсичности, изменения вкуса, запаха воды и т.д., негативное воздействие может оказать и вся совокупность органических компонентов, присутствующих в речной воде. Не все органические вещества токсичны, более того многие из них служат пищей для различных микроорганизмов. Однако значительно чаще мы встречаемся с вредным влиянием органических веществ. Аэробные микроорганизмы, в питание которых используются органические вещества, потребляют кислород, растворенный в воде. Если это потребление превышает пополнение свежим кислородом из воздуха, наступает дефицит кислорода в воде, что влечет за собой тяжелые последствия для водного населения. Для нормальной жизнедеятельности рыб, простейших организмов и аэробных бактерий содержание кислорода в воде водоема не должно опускаться ниже 3-4 мг/л. При остром недостатке кислорода в реке поселяются анаэробные микроорганизмы, и река загнивает. Таким образом, в реках идет процесс самоочищения, который, однако, нуждается в постоянном контроле, чтобы количество поступающих органических веществ не превысило допустимое.

В качестве исходных данных использовались климатографические данные Уссурийской метеостанции, данные проб воды [12], взятые непосредственно в реке. Станции отбора проб были выбраны таким образом, чтобы охватить участки интенсивного воздействия на водоток.

В результате был проведен полный анализ качества воды Уссурийского района, а содержание загрязняющих веществ было сравнено с соответствующими ПДК данных веществ в водотоках [11].

Проведенные исследования показали, что загрязнение вод рек Комаровка, Раковка и Раздольная обусловлено не только мощной нагрузкой со стороны промышленных предприятий и транспорта, но и введением в них неочищенных и недостаточно очищенных бытовых стоков от домов частного сектора, а также смывом с сельскохозяйственных участков. Количество некоторых загрязняющих веществ превышает ПДК в несколько раз, что говорит о том, что реки Уссурийского района относятся к сильно загрязненным рекам.

Основные результаты и выводы, полученные в работе

1. Сформулирована и исследована задача восстановления младшего коэффициента эллиптического уравнения конвекции-диффузии-реакции, характеризующего распад загрязняющего вещества за счет химических реакций. Указанная задача сведена к задаче минимизации определенного функционала качества на слабых решениях исходной краевой задачи. Установлены достаточные условия на исходные данные, обеспечивающие существование, единственность и устойчивость решения данной задачи.
2. Для решения задачи идентификации младшего коэффициента разработаны численные алгоритмы, основанные соответственно на двухслойном градиентном итерационном методе и алгоритме Ньютона.
3. Сформулированы и численно исследованы задачи идентификации плотности источника одномерного и двумерного параболического уравнения конвекции - диффузии - реакции. Разработаны эффективные численные алгоритмы их решения, основанные на сведениях к краевой задаче для соответствующего нагруженного параболического уравнения конвекции - диффузии - реакции.
4. Разработан комплекс программ по реализации созданных алгоритмов, обработке больших объемов информации и визуализации результатов вычислительных экспериментов, проведен детальный анализ полученных результатов.
5. Проведен мониторинг экологического состояния рек Комаровка, Раковка и Раздольная, протекающих в Уссурийском районе Приморского края, с использованием модели качества воды QUAL2K.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ-2810.2008.1), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-01-98518-р-восток-а), ДВО РАН (гранты №№ 09-И-П29-01, 09-И-СУ03-003, 09-И-А-03-07).

Литература

1. Alekseev C.V., Adomavichus E.A. Theoretical analysis of inverse extremal problems of admixture diffusion in viscous fluids // *J. Inv. Ill-Posed Problems*. 2001. V. 9. N 5. P. 435-468.
2. Алексеев Г.В. Обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений тепловой конвекции // *Вестник Новосибирского ун-та. Сер. матем. механ. информ.* 2006. Т. 6, № 2. С. 6-32.
3. Алексеев Г.В. Коэффициентные обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений тепломассопереноса // *Журн. вычисл. мат. и мат. физики*. 2007. Т. 47. N 6. С. 1055-1076.
4. Алексеев Г.В., Калинина Е.А. Идентификация младшего коэффициента для стационарного уравнения конвекции – диффузии – реакции // *Сиб. журн. индустр. матем.* 2007. Т. 11. N 1. с.3-16.
5. Алексеев Г.В., Соболева О.В., Терешко Д.А. Задачи идентификации для стационарной модели массопереноса // *Прикл. мех. техн. физ.* 2008. Т. 49, N 4. С. 24-35.
6. Алексеев Г.В., Терешко Д.А. Анализ и оптимизация в гидродинамике вязкой жидкости. Владивосток: Дальнаука, 2008. 365 с.
7. Алексеев Г.В. Оптимизация в стационарных задачах тепломассопереноса и магнитной гидродинамики. Москва: Научный Мир, 2010. 412 с.
8. Калинина Е.А. Численное исследование обратной задачи восстановления плотности источника двумерного нестационарного уравнения конвекции – диффузии. *Дальнев. матем. журн.* 2004.Т.5. N1. с.89-99.
9. Калинина Е.А. Об экологическом мониторинге качества воды для некоторых моделей распространения загрязнений в океане // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Т 17. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2009. С. 283-286.
10. Криксин Ю.А., Плюшев С.Н., Самарская Е.А., Тишкин В.Ф. К вопросу о единственности решения обратной задачи конвективной диффузии // *Препринт Ин-та математического моделирования РАН № 23*. 1994.
11. Орлов Д.С., Садовская Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002.
12. Христофорова Н.К., Шишлова Т.М., Потенко Е.И. Химико-экологическая оценка водотоков г.Уссурийска (Приморский край)// *Проблемы региональной экологии*. 2000. № 5. С. 13-16.
13. Borukhov V., Vabishchevich P. Numerical solution of the inverse problem of reconstructing a distributed right-hand side of a parabolic equation // *Computer Physics Communications*. 2000. Vol. 126, N 1-2. P. 32-36.
14. M.M. Chawla, M.A. Al-Zanaidi, M.S. Al-Sahhar A class of stabilized extended one-step methods for the numerical solution of ODEs // *Computers Math. Applic.* 1995. Vol. 29, N. 10. P. 79-84.

Вихревое перемешивание и энергетика турбулентности в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое

А.Ф. Курбацкий¹, Л.И. Курбацкая²

¹ Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

1. Введение

Движение воздуха в атмосфере обычно с большой точностью описывается системой уравнений в приближении свободной конвекции (или в приближении Буссинеска). Уравнение баланса кинетической энергии турбулентности (КЭТ), $E_k = \overline{u_i' u_i'} / 2$, имеет в этом случае вид [1]:

$$\frac{\partial E_k}{\partial t} + U_j \frac{\partial E_k}{\partial x_j} = \frac{\partial M_j}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} (1 - Ri_f) - \varepsilon, \quad (1)$$

где $Ri_f = \beta g \overline{\theta' w'} / \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -G / P$ – потоковое число Ричардсона.

Потоковое число Ричардсона Ri_f выражает отношение потока плавучести $G = \beta g \cdot \overline{\theta' w'}$ и порождения кинетической энергии турбулентности (КЭТ) сдвигом скорости $P = -\overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}$. В (1) $\partial M_j / \partial x_j$ – дивергенция потока КЭТ, средние величины обозначены прописными буквами, турбулентные флуктуации величин – строчными буквами со штрихом; $\overline{u_i' u_j'}$ – напряжения Рейнольдса; $\overline{\theta' w'}$ – вертикальный турбулентный поток тепла.

Потоковое число Ричардсона прямо связано с коэффициентами вихревой диффузии импульса K_m и тепла K_h и рассматривается, как ключевой параметр при моделировании геофизических течений. В мезомасштабной трехпараметрической ($E - \varepsilon - \overline{\theta'^2}$) модели турбулентности [2, 3] потоковое число Ричардсона выражается через турбулентное число Прандтля Pr_T и градиентное число Ричардсона $Ri_g = N^2 / S^2$ ($N = \beta g (\partial \Theta / \partial z)^{1/2}$ – частота плавучести, $S = ((\partial U / \partial z)^2 + (\partial V / \partial z)^2)^{1/2}$ – сдвиг горизонтальной скорости ветра):

$$Ri_f = \frac{-1}{Pr_T} Ri_g - \frac{\beta g \gamma_c}{K_m S^2},$$

где $Pr_T = K_m / K_h$ – турбулентное число Прандтля; γ_c – “температурный противогradient”, учитывающий вклад крупномасштабных вихрей в вертикальный перенос тепла в атмосфере [2].

В настоящей работе, с использованием мезомасштабной трехпараметрической RANS-модели атмосферной турбулентности, исследуется эффективность вихревого перемешивания импульса и тепла в устойчиво стратифицированном АПС. Путем численного моделирования прослеживается эволюция потокового числа Ричардсона, анализируется энергетика турбулентности, режимы *сильного* и *слабого* перемешивания.

2. Определяющие уравнения устойчиво стратифицированного атмосферного пограничного слоя

Основные уравнения для атмосферного пограничного слоя (АПС) над плоской поверхностью выводятся из уравнений Навье – Стокса при использовании приближения Буссинеска путем разделения истинного движения на среднее и турбулентное с последующим пренебрежением дивергенцией турбулентного потока в горизонтальном направлении и молекулярной вязкостью.

Для моделирования эволюции горизонтально однородного атмосферного пограничного слоя система определяющих уравнений, описывающая течение, имеет вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(V - V_g) - \frac{\partial \overline{u' w'}}{\partial z}; \quad \frac{\partial V}{\partial t} = -f(U - U_g) - \frac{\partial \overline{v' w'}}{\partial z}; \quad \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{\theta' w'}}{\partial z},$$

где U и V обозначают компоненты скорости среднего горизонтального ветра; Θ – отклонение средней потенциальной температура от “стандартного состояния” в градусах Кельвина; f – параметр Кориолиса; U_g , V_g – компоненты скорости геострофического ветра; $\overline{u' w'}$, $\overline{v' w'}$ – компоненты полного турбулентного потока импульса.

Определяющие уравнения трехпараметрической ($E - \varepsilon - \overline{\theta'^2}$) модели атмосферной турбулентности, замыкающие выражения для турбулентных потоков импульса ($\overline{u'w'}, \overline{v'w'}$) и тепла ($\overline{\theta'w'}$), структура вихревых коэффициентов диффузии импульса и тепла, а также граничные условия для кинетической энергии турбулентности (E_k), скорости ее спектрального расходования (ε) и дисперсии температурных флуктуаций ($\overline{\theta'^2}$) приведены в [2, 3, 4] и здесь полностью не повторяются. Для дальнейшего достаточно ограничиться приведением в краткой форме замыкающих соотношений для турбулентных потоков импульса и тепла.

2.1. Вихревые потоки импульса и тепла. Параметризации турбулентных потоков импульса и тепла в трехпараметрической RANS-модели атмосферной турбулентности, учитывающей эффект внутренних волн на перенос импульса, имеют вид “градиентной диффузии” (или “диффузии по градиенту”) [3]:

$$\left(\overline{u'w'}, \overline{v'w'}\right) = -K_m \left(\frac{\partial U}{\partial z}, \frac{\partial V}{\partial z}\right); \quad \overline{\theta'w'} = -K_h \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \gamma_c,$$

$$K_m = E\tau S_m, \quad K_h = E\tau S_h,$$

где $S_m = \frac{1}{D} f_m(G_h, \beta \overline{\theta'^2})$, $S_h = \frac{1}{D} f_h(G_h)$ – структурные функции; $\gamma_c = \gamma_c(G_m, G_h, \beta \overline{\theta'^2})$ – температурный противогradient; $G_m \equiv (\tau S)^2$, $G_h \equiv (\tau N)^2$, $D = D(G_m, G_h)$, $\tau = E_k \cdot \varepsilon^{-1}$. Детальный вид функций S_m , S_h , γ_c и D можно найти в [3, 4].

2.2. Численное моделирование устойчивого АПС. Трехпараметрическая модель турбулентности [2, 3, 4] физически корректно учитывает влияние плавучести на турбулентный перенос импульса и тепла, включает эффект внутренних гравитационных волн на перенос импульса в условиях устойчивой стратификации [3, 4].

В вычислительном эксперименте начальными условиями определялось задание геострофического ветра ($U = U_g = 8 \text{ мс}^{-1}$ по всей высоте пограничного слоя, $V_g = 0$; скорость геострофического ветра направлена по оси x). Отклонение потенциальной температуры на поверхности Земли задается в виде аналитической зависимости от времени, аппроксимирующей данные наблюдений, $\Theta_g(x, 0, t) = 6 \text{ Sin}(\pi t/43200)$, где t – текущее время в секундах. Это единственное нестационарное граничное условие задачи, которое моделирует 24-часовой цикл нагревания солнцем земной поверхности. Для получения сильно стратифицированного пограничного слоя температура на поверхности в ранние вечерние часы, когда поток тепла становится отрицательным и развивается устойчивая стратификация, задается далее убывающей с постоянной скоростью, равной $0, 25 \text{ Кчас}^{-1}$. Потенциальная температура полагается постоянной до высоты 100 м , а затем она возрастает со скоростью $0, 01 \text{ Км}^{-1}$. Значение аэродинамической шероховатости (z_0) выбрано равным $0,1 \text{ м}$. Влажность не рассматривается. Начальные поля турбулентных величин ($E, \varepsilon, \overline{\theta'^2}$) задаются в виде малых ‘фоновых’ значений. На верхней границе пограничного слоя для всех искомым функций использованы условия Неймана, за исключением температуры, граничное значение для которой определено условием сохранения градиента потенциальной температуры в ближайших к границе узлах вычислительной сетки. Вертикальное разрешение равно $6, 25 \text{ м}$ в пределах первых 100 м от подстилающей поверхности, с последующим растяжением сетки в вертикальном направлении вплоть до высоты 1000 м (выше, до 5000 м , шаг сетки постояен). Для решения определяющих уравнений турбулентного пограничного слоя использован полунейвный конечно-разностный метод (вторая схема с разностями против потока [5]) на смещенной сетке.

3. Потокое число Ричардсона. Режимы вихревого перемешивания

Потокое число Ричардсона, как выше отмечено, является ключевым параметром, используемым при моделировании турбулентности геофизических течений. Полуэмпирическая зависимость между числами Ri_f и Ri_g использовалось, например, в схемах замыкания турбулентности [6, 7]. В результате решения упрощенных уравнений для напряжений Рейнольдса и потока тепла в [6, 8] было предложено полуэмпирическое соотношение:

$$Ri_f = 0,725 \left[Ri_g + 0,186 - (Ri_g^2 - 0,316 Ri_g + 0,0346)^{1/2} \right], \quad (2)$$

которое дает монотонное возрастание Ri_f с увеличением Ri_g до максимального значения, равного 0.25 . Улучшенная полуэмпирическая параметризация [7], основанная на LES данных для не нейтральных периодов АПС, имеет вид:

$$Ri_f = 0,774 \left[Ri_g + 0,220 - (Ri_g^2 - 0,328 Ri_g + 0,0484)^{1/2} \right]. \quad (3)$$

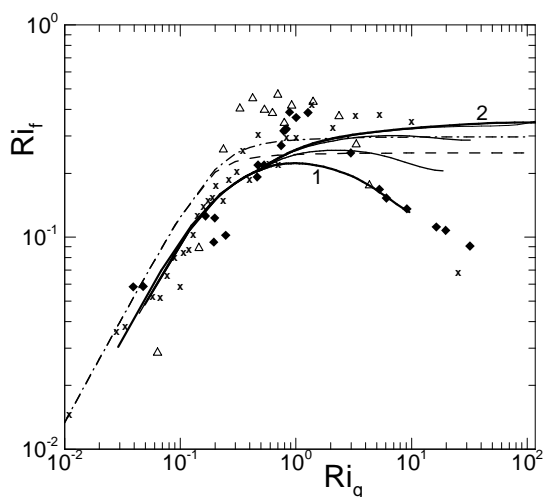


Рис. 1. Зависимость Ri_f от Ri_g .

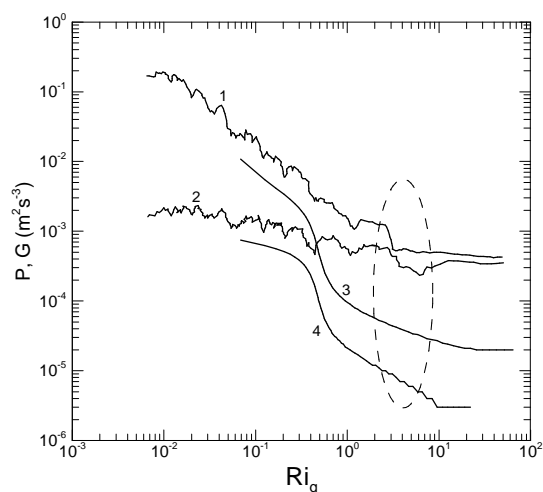


Рис. 2. Генерация КЭТ (P) и поток плавучести (G) как функции устойчивости течения.

3.1. Эволюция потокового числа Ричардсона (Ri_f). На рис. 1 показаны зависимости $Ri_f - Ri_g$, полученные при численном моделировании эволюции АПС с использованием трехпараметрической RANS – модели турбулентности [3], в сравнении с некоторыми данными измерений из [9] (показаны символами различной конфигурации) и полуэмпирическими зависимостями (2) – (3).

Рис. 1 показывает, что в ранние вечерние часы (линия 1 на рисунке соответствует 18:00; время начала вычислений: 07:00), в переходный период к сильно устойчивому состоянию, потоковое число Ричардсона ведет себя немонотонно, достигая насыщения при значении $Ri_g \approx 1$. Немонотонное поведение числа Ri_f в зависимости от градиентного числа Ричардсона получено также, например, для струйного течения в тропопаузе методом прямого численного моделирования уравнений гидродинамики [10]. В сильно устойчивом состоянии ночного пограничного слоя (линия 2 на рис. 1 соответствует 03:00 часам) поведение потокового числа Ричардсона носит монотонный характер, как и в полуэмпирических параметризациях (2) – (3), показанных штриховой и штрихпунктирной линиями, соответственно. Тонкие сплошные линии, между линиями 1 и 2 на рис. 1 соответствуют промежуточным моментам времени.

Рис. 2 показывает, полученное при численном моделировании, порождение турбулентности сдвигом скорости P (линия 3) и поток плавучести G (линия 4) в сравнении с порождением турбулентности P (линия 1) и потоком плавучести G (линия 2), которые вычислены в [9] по данным измерений в атмосфере.

Следуя [9], можно выделить характерные режимы эволюции устойчиво стратифицированного пограничного слоя, основываясь на рис. 1, 2. При $Ri_g < 0.1$ имеет место ‘приблизительно нейтральный’ режим, характеризующийся слабой стратификацией, с низким потоком тепла (или плавучести) по сравнению с порождением сдвигом скорости. При $0.1 < Ri_g < 1$ оба механизма, P и G , сравнимы, перемешивание эффективно, что может быть связано с активностью неустойчивостей Кельвина Гельмгольца. Диапазон $1 < Ri_g < 10$ может рассматриваться, как ‘очень устойчивый’ режим, с относительно низкими значениями P и G . Рис. 2 показывает, в частности, что поток плавучести поддерживается вплоть до значения $Ri_g \approx 10$ (отмечено на рисунке штриховой линией в форме эллипса) и существенно ослабляется после этого.

4. Энергетика турбулентности устойчиво стратифицированного атмосферного пограничного слоя

Для устойчиво стратифицированной турбулентности с вертикальным сдвигом горизонтальной скорости S , и частотой плавучести $N = (-g / \rho_0 (\partial \bar{\rho} / \partial z))^{1/2}$ турбулентная потенциальная энергия определяется выражением

$$E_p = -\frac{1}{2} \frac{g}{\rho_0} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} \right)^{-1} \overline{\rho'^2} \quad (12)$$

($\bar{\rho}$ – среднее значение плотности; ρ' – турбулентная флуктуация массовой плотности; g – ускорение силы тяжести).

Флуктуации плотности в приближении Буссинеска можно выразить через флуктуации потенциальной температуры θ' [1]

$$\rho' = -\beta \rho_0 \theta',$$

где $\beta = 1/\Theta_0$, а Θ_0 и ρ_0 - предписанные значения потенциальной температуры и плотности, соответственно. Следовательно

$$\overline{\rho'^2} = \beta^2 \rho_0^2 \overline{\theta'^2}$$

и турбулентная потенциальная энергия E_p может быть выражена через дисперсию турбулентных флуктуаций температуры

$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{\beta g}{N} \right)^2 \overline{\theta'^2}$$

На рис. 3 представлена величина турбулентной потенциальной энергии E_p , нормализованная на полную энергию $E = E_p + E_k$, в зависимости от градиентного числа Ричардсона (Ri_g) вместе с результатами измерений в атмосфере, аэродинамической трубе и LES данными, взятыми по работе [11]. Как и LES данные, результаты численного моделирования для устойчивого пограничного слоя (сплошная линия на рис. 3) показывают монотонную зависимость: отношение E_p / E возрастает с ростом числа Ri_g , стремясь к предельному значению $E_p / E \approx 0,21$.

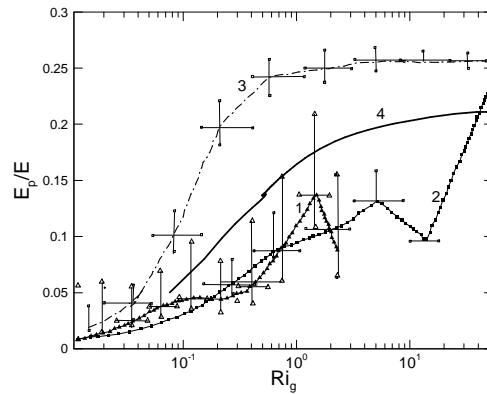


Рис. 3. Фракция турбулентной потенциальной энергии E_p / E как функция устойчивости течения.

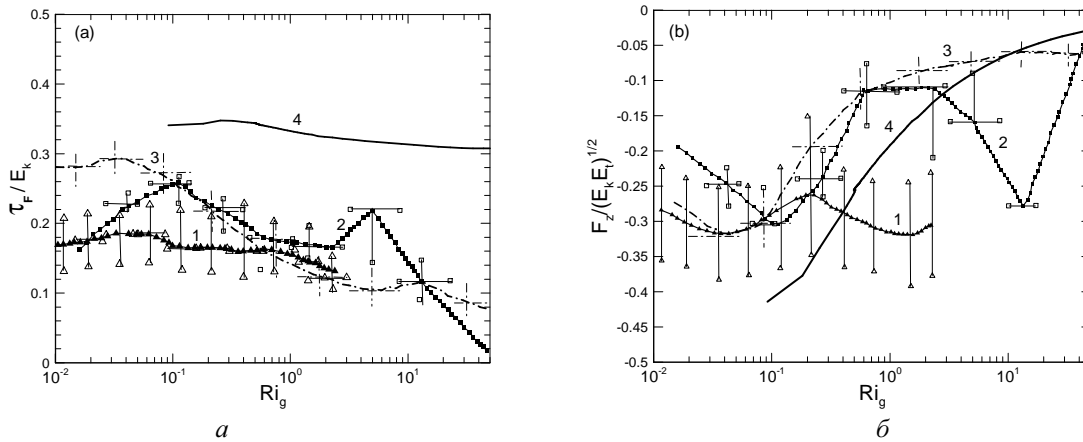


Рис. 4. Профили нормализованных турбулентных потоков импульса (а) и тепла (б).

Вычисленные нормализованные отношения полного потока импульса τ / E_k (рис. 4,а) и вертикального потока тепла $-\overline{w'\theta'} / (E_k E_\theta)^{1/2}$ (рис. 4,б) показывают, что в очень устойчивом режиме ($Ri_g > 1$), или режиме “слабого перемешивания”, эффективно транспортируется импульс:

$\tau / E_k \rightarrow const \approx 0.3$ ($\tau = \sqrt{((-u'w')^2 + (-v'w')^2)}$, $E_\theta = \frac{1}{2} \overline{\theta'^2}$). В то же самое время перенос тепла

падает до значения $-\overline{w'\theta'} / (E_k E_\theta)^{1/2} \approx 0.05$ при $Ri_g = 50$. Этот результат, конечно, согласуется как с данными измерений [12] в атмосферном пограничном слое вихревых коэффициентов диффузии импульса (K_M) и тепла (K_H), так и с вычисленными зависимостями от числа Ri_g и обратного турбулентного числа Прандтля (Pr_T) в [13]. Можно подчеркнуть, что значение $Ri_g \approx 0.2$, при котором отчетливо фиксируется в [3, 13] переход от режима “сильного перемешивания” к режиму “слабого перемешивания”, никак не связано с тем же значением (критического) градиентного числа Ричардсона, вытекающим из классической линейной теории устойчивости. То есть, этот “порог” не разделяет

турбулентный и ламинарный режимы, как устанавливает классическая концепция, а разделяет два различных турбулентных режима.

Сопоставляя различные результаты на рис. 3, 4 следует иметь в виду, что в экспериментах очень большие градиентные числа Ричардсона наблюдаются выше турбулентного пограничного слоя, в сильно неоднородной “запирающей” температурной инверсии, куда значительные количества турбулентной кинетической и потенциальной энергии переносятся изнутри пограничного слоя. Вследствие этого энергетика турбулентности не полностью контролируется локальными факторами, и отношение E_p / E зависит не только от локального градиентного числа Ричардсона, но в большей степени от начальных и граничных условий. Кроме того, можно заметить, что необходимость задания в трехпараметрическом методе моделирования турбулентности искомым величин (E_k , скорости ее спектрального расходования ε и дисперсии температурных флуктуаций $\overline{\theta'^2}$) на первом расчете по вертикали уровне не позволяет воспроизвести нейтральный режим ($Ri_g < 0.1$) при эволюции пограничного слоя от конвективного состояния к устойчивому состоянию при заданных начальных и граничных условиях. При моделировании только устойчивого пограничного слоя (когда подстилающая поверхность сразу охлаждается с постоянной скоростью, как в [3]), режим сильного перемешивания ($0.01 < Ri_g < 1$) воспроизводится, приближенно, таким же, как и при LES моделировании (штрихпунктирная линия на рис. 3).

5. Заключение

Результаты численного моделирования эволюции термически устойчиво стратифицированного пограничного слоя показали, что трехпараметрический метод моделирования стратифицированной турбулентности в согласии с данными измерений и наблюдений правильно отражает основные физические механизмы трансформации импульса и тепла с ростом устойчивости течения. Трехпараметрический метод, включая уравнения баланса для кинетической и потенциальной энергий, дает возможность анализировать преобразования турбулентной энергии в стратифицированных геофизических течениях. Такой анализ подтверждает современную точку зрения против использования энергетического “критического” градиентного числа Ричардсона при построении схем замыкания турбулентности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-05-00004а), а также в рамках Интеграционного проекта СО РАН № 23, программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 4 и Отделения математических наук РАН № 3.

Литература

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. С-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. Т. 1. С. 694.
2. Kurbatskiy A.F., Kurbatskaya L.I. $E - \varepsilon - \overline{\theta'^2}$ turbulence closure model for an atmospheric boundary layer including the urban canopy // Meteorol. Atmos. Phys. 2009. Vol. 104. P. 63-81.
3. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. О турбулентном числе Прандтля в устойчиво стратифицированном атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46, № 2. С.187-196.
4. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Моделирование устойчивого пограничного слоя со струей низкого уровня // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51, № 5. С. 42-51.
5. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Изд-во “Мир”, 1980.
6. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulent closure model for geophysical problems // Rev. Geophys. Space Phys. Vol. 20. P. 851-875.
7. Nakanishi M. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data // Bound.-Layer Meteor. 2001. Vol. 99. P. 349-378.
8. Yamada T. The critical Richardson number and the ratio of the eddy transport coefficients obtained from a turbulence closure model // J. Atmos. Sci. Vol. 32. P. 926-933.
9. Pardyjak E.R., Monti P., Fernando H.J.S. Flux Richardson number measurements in stable atmospheric shear flows // J. Fluid Mech. 2002. Vol. 459. P. 307-316.
10. Mahalov A., Nicolaenko B., Tse K.L., Joseph B. Eddy mixing in jet-stream turbulence under stronger stratification // Geophys. Res. Letters. 2004. Vol. 31. L23111.
11. Zilitinkevich S.S., Elperin T., Kleerorin N. et al. Turbulence energetic in stably stratified geophysical flows: Strong and weak mixing regimes // Quarterly Journal of the Meteorological Society. 2008. Vol. 134. P. 793-799.
12. Monti P., Fernando H.J.S., Princevac M. Et al. Observations of flow and turbulence in the nocturnal boundary layer over a slope // J. Atmos. Sci. 2002. Vol. 59. P. 2513-2534.
13. Курбацкий А.Ф., Курбацкая Л.И. Структура поля ветра в устойчиво стратифицированном пограничном слое над шероховатой поверхностью // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 3. С. 1-10.

Воздействия природно-климатических факторов на состояние растительности Уюкского хребта

Х.Б. Куулар¹, Е.И. Пономарев², С.А. Чутикова¹

¹Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл

²Институт леса им В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск

Район и объект исследований

Объектом исследования данной работы являются горные леса Уюкского хребта – отрога Западного Саяна, высотой до 2310 над уровнем моря. Бореальные леса Уюкского хребта играют важную роль в формировании устойчивых лесных экосистем региона и выполняют экологические (климаторегулирующие, противозерозионные), социально-экономические функции. На экологию и экономику региона влияют как процессы, связанные с природопользованием (несоблюдение мер осторожного обращения с огнем при сборе побочных продуктов леса), так и природные негативные факторы (пожары от гроз, изменение климата).

Климат региона резко континентальный, летом засушливый, с низким уровнем влажности. Распределение осадков в течение сезона крайне неравномерное, 60% осадков выпадают с мая по сентябрь месяцы, 10% – зимой. В основу лесорастительного районирования положен биоклиматический подход, учитывающие гидротермические характеристики, термические условия, степень континентальности. Такие суровые климатические факторы, также интенсивная солнечная радиация и низкая влажность в начале вегетационного периода создают неблагоприятные условия для растительности.

Уюкский хребет представляет собой сильно расчлененное низкогорье, слабо расчлененное среднегорье на северных пологих склонах и резко расчлененное среднегорье на южных склонах. Высота местности и рельеф также сказываются на характере размещения экосистем, так как различны, например, количество солнечной радиации и осадков на склонах разной экспозиции, различен тепловой режим. Расчлененность горного рельефа и резкая континентальность климата создали условия для пестроты растительности на относительно небольших территориях, которые отличаются друг от друга на уровне экосистем из разных высотно-поясных комплексов (ВПК). Рельеф перераспределяет влагу, поэтому растительность верхней, средней или нижней частей склона находится в совершенно разных условиях увлажнения.

Хребет относится к Хемчикско-Куртушибинскому округу горных степей и горно-таежных травяных лиственничных лесов, Алтае-Тувинско-Хангайской котловинно-горной лесорастительной провинции горных степей и лиственничных лесов, Центрально-Азиатской котловинно-горной лесорастительной области [8]. Леса представлены почти на 90% хвойными породами, кедром почти 40% от покрытых лесом земель. На северном макросклоне лесной пояс начинается уже на высоте 900 м н.у.м.

В целом для хребта характерна экспозиционная асимметрия ландшафтов. Северный склон подвергается меньшей солнечной инсоляции, что создает благоприятные условия для развития древесной растительности. Лесной пояс начинается на высоте около 900 м от подножий. Темнохвойный лес появляется с 1050 м н.у.м. в разнотравном типе леса на теневых экспозициях (северо-восточных, северо-западных и северных). На южных склонах хребта повышенная инсоляция и испарение способствуют широкому распространению степной растительности. Только на высотах 1100–1200 м появляются отдельные островки лесов по теневым склонам и лишь с высоты 1300 м леса начинают преобладать в растительном покрове.

Высокогорно-таежный ВПК на высотах 1600–1400 м н.у.м. образован преимущественно кедровыми лесами, реже лиственничниками. В смешанных насаждениях и чистых лиственничниках на южных склонах мхи не формируют сплошного покрова.

Среднегорный и низкогорный подтаежный ВПК занимает высоты в пределах 1400–1100 м н.у.м. Для пояса характерны своеобразные кедрово-лиственничные леса с равномерным участием в древостое кедра и светлохвойных пород с подлеском из мезофильных кустарников.

Данный хребет является центром организации досуга населения близлежащих поселков и города Кызыл. Хребет расположен недалеко от города и является доступным местом отдыха жителей города с населением 104,1 тыс. человек (34,1% всего населения региона), где сосредоточена основная часть городского населения региона. Здесь расположены зимние базы отдыха и горнолыжные трассы. В летние и осенние сезоны данная территория служит местом заготовки ягод (голубики, брусники, земляники, клюквы, малины, смородины) и кедровых орехов [1]. Без учета динамики изменения состава лесов, а также анализа природных процессов, происходящих в лесах невозможны реальные прогнозы глобальных изменений природной среды.

Результаты и обсуждение

С учетом воздействия всех негативных факторов, влияющих на состояние растительности в районе исследований, повышенное внимание следует уделять вопросам сохранения растительности, прогнозированию возможных обратимых и необратимых изменений. Увеличение в последние десятилетия среднегодовой весенней и летней температуры становятся наиболее важными факторами и привели к увеличению воздушной и почвенной влаги. В результате темнохвойные леса восточных и северных склонов не успевают адаптироваться к быстрым изменениям климата и находятся в чужлом состоянии. И на ухудшение состояния горно-таежных лесов хребта, возможно, оказывают потепления климата [3].

Так, растительность из-за изменения климата меняется в течение десятилетий и веков, а от пожаров меняется в течение нескольких дней. В последнее время во всем мире вследствие изменений климата увеличивается частота пожаров, ежегодно возникают массовые лесные пожары. При этом наиболее значимым фактором возникновения зажиганий остается — антропогенный. Статистика последних трех лет показывает, что в России более 85% пожаров возникают по вине человека. В Республике Тыва в 2010 г. по статистике 43 % пожаров возникли по вине человека.

По данным Туранской метеостанции проведен анализ колебания среднегодовой температуры за 46 лет (в период 1961–2006 гг.). Выяснилось, что среднегодовая температура в 1970-е гг. повысилась на 0.75 °С, в 1980-е гг. — на 0.45 °С, в 1990-е гг. — на 0.51 °С, в 2000-е гг. — на 0.15 °С. Среднегодовая температура последнего десятилетия повысилась на 1.86° С по сравнению с 60-ми годами. Среднегодовая температура воздуха выше на 6,6°С по сравнению с данными метеостанции Эрзин (южная часть региона). И среднегодовая температура воздуха ниже на 1.1°С по сравнению с данными метеостанции г.Чадан (юго-западная часть региона).

Средняя годовая температура за 1961–2006 гг. –2.7°С. Климат низкогорий относительно теплый и влажный. Средняя температура января –28 °С, продолжительность зимы 150–170 дней. Высота снежного покрова от 7 до 30 см. В июле средняя температура 18.5 °С. Сумма температур выше 10 °С составляет 1500–500 °С, средняя ежегодная влажность — 330 мм. У подножья южного макросклона хребта в лесостепной зоне характерен дефицит влаги. С поднятием в горы на каждые 100 м температура падает на 0.5 °С, континентальность несколько сглаживается. Горно-таежная зона характеризуется суровой зимой, продолжительность вегетационного периода — 30 дней.

Для оценки экологического состояния бореальных лесов района исследований нами используются материалы полевых обследований и методы геоинформационной обработки пространственно распределенных данных, полученных на тестовом участке. Профиль заложен от подножья северного макросклона до степной зоны южного макросклона (69 на 74 км) (рис. 1).

Продолжительность пожароопасного периода территории Уюкского хребта составляет 210 дней. Горимость начинается в начале апреля и продолжается до конца октября. В 1-ой декаде апреля отмечается начало пожароопасного сезона, который может длиться до 3-ей декады октября. Наибольшую природную пожарную опасность имеют гари, необлесившиеся лесосеки со значительными запасами сухостоя и захламленностью.

В период 1996–2010 гг. из 106 пожаров 72 возникли весной (март-май), 25 пожаров — летом, 9 — осенью. Из приведенного графика видно, что высоко опасными являются май (38.7 %), апрель (28.3%), затем июнь (13.2%) месяцы (Рис. 2).

Преобладание весенних пожаров связано с тем, что в апреле идет интенсивное испарение снега при резком повышении температуры воздуха и малой относительной влажности. Это приводит к интенсивному высушиванию проводников горения на южных склонах степных и лесостепных поясов. Характерный ветер весеннего сезона способствует активному просыханию почвы и прошлогодней сухой травяной растительности. Весенние пожары в основном возникают в поясе низкогорий южных склонов, которые отличается наименьшим количеством осадков – 150–330 мм в год [5].

Высокая степень антропогенной нагрузки, особенно весной при сухой погоде, наносит серьезный ущерб лесной экосистеме хребта. Частое посещение леса приводит к вытаптыванию травяного покрова и снижению естественного возобновления подроста основных древесных пород (лиственницы и кедра). В основном источником возникновения пожаров являются сборщики (ягод, орехов, грибов) и охотники. В 2007 г. такая нагрузка привела к большому пожару в начале сентября в окрестности станции “Тайга”. В плане возникновения пожаров растительности в Республике Тыва наиболее опасны длительный период дефицита осадков и высоких температур, например, как во время засухи в 2007 г. [3].

В результате проведения интенсивной охраны лесов в пожароопасный сезон 2010 г. на территории хребта за прошлый год зарегистрирован 1 пожар с лесной площадью 1.5 га и 2.5 га нелесной площадью. Пожары в лесах хребта связано с повышенной нагрузкой, интенсивной антропогенной деятельностью. По причинам экономического характера в последние 20–30 лет происходят значительные изменения. Без учета динамики изменения состава лесов Тувы, а также анализа природных процессов, происходящих в лесах невозможны реальные прогнозы глобальных изменений природной среды.

Такие модели используются в полевых условиях, но компьютерное моделирование является высокой точностью. В то же время прогнозировать изменения региональных и локальных пожарных режимов сложно, поскольку изменения могут быть вызваны вероятными изменениями в источниках огня, например, увеличение грозовой активности. Возможно, они будут вызывать более резкие изменения, исходя из скорости адаптации бореальной растительности на изменения температуры воздуха и степени доступности влаги.

Природные пожары как явления существуют благодаря отклонениям хода погоды от климатических норм, особенно при отклонениях от среднего периода между выпадениями осадков в сторону его увеличения, т.е. развития засух. Засухи обычно вызывают резкое увеличение количества природных пожаров и способствуют развитию крупных пожаров [5]. При изменении климата пожары могут стать катализатором изменений бореальных лесов. Частые пожары снижают не только прирост насаждений, и снижают защитные функции лесов (водоохранные, почвозащитные и др.).

Задачи стабилизации окружающей среды, в том числе охрана и восстановления лесов все больше возрастает. И в настоящее время современные методы – ГИС-технологии занимает ведущее место в таких исследованиях. Согласно общей схеме методологического подхода мониторинга биоразнообразия лесов, основными информационными его составляющими являются ДДЗ, что представляют участки с наибольшей трансформации. Современный этап развития методологии мониторинга лесов с целью выработки стратегий рационального лесопользования и защиты окружающей среды предполагает в качестве обязательной компоненты использование методов дистанционного зондирования и геоинформационных систем (ГИС). Оценка воздействия факторов окружающей среды, своевременное выявление потенциальных опасностей и прогноз последствий является актуальным направлением исследований сегодня.

Полевые, архивные и картографические материалы в ГИС-пакетах преобразуются в векторные информационные покрытия. ГИС служат эффективным инструментом многофакторного анализа, пространственного моделирования и прогнозирования устойчивости экосистемы района исследований к возмущающим факторам.

Пожары растительности Уюкского хребта становятся важным фактором, определяющим устойчивость бореальной растительности, нежели прямое воздействие изменения климата. Увеличение количества пожаров, вызванное климатическими изменениями, может привести к обострению экологических последствий в горах Южной Сибири.

Заключение

Для оценки горимости растительности профильного участка Уюкского хребта были использованы данные Красноярской базы авиационной охраны лесов, материалы оперативного детектирования пожаров по спутниковым данным и данные Госкомитета по лесному хозяйству Республики Тыва, данные Гидрометеостанции Республики Тыва.

В результате комплексного анализа данных получена картина динамики и периодичности количества пожаров растительности на исследуемой территории за срок наблюдения 1996-2010 гг. Увеличение числа пожаров в пожароопасные сезоны связаны с повышением весенних и летних температур. По данным Гидрометеостанции Республики Тыва, наблюдается заметное повышение весенних и летних температур: с 1979 по 2006 гг. среднеапрельские температуры повысились на 1.6°C, среднелетние – на 2°C.

За 15 лет пройденных огнем лесной площади составляла 7178 га, нелесной площади – 6925.99 га. О масштабности пожаров можно судить по площади крупных пожаров за последнее десятилетие. В 2001 г. повреждено 882 га, в 2005 г. – 105 га, в 2007 г. – 2403 га, в 2008 г. – 3909.07 га в 2009 г. – 1493.45 га лесной территории. А в последние пять лет количество пожаров увеличилось в 1.8 раз.

Литература

1. Куулар Х.Б., Чупикова С.А., Чоксум Ж.Э. Анализ трансформации растительности Уюкского хребта в геоинформационной среде // Матер. VII Междунар. науч. конгр. «Гео–Сибирь–2011». Новосибирск, 19–29 апр. 2011 г. Новосибирск: СГГА, 2011. Ч.2 С. 219-222.
2. Куулар Х.Б., Дробушевская О.В. Подрост кедрового сибирского горных лесов Республики Тыва // Сб. матер. II Междунар. конф. «Ресурсная экономика, изменение климата и рациональное природопользование (РЕЕСС-2011)» Красноярск, 2011. Красноярск: СФУ, 2011. С. 207–209.
3. Куулар Х.Б., Пономарев Е.И., Кызыл-оол В.С. Лесные пожары в горах Тувы и их мониторинг // Матер. всерос. конф., с междунар. участием «Пожары в лесных экосистемах Сибири». Красноярск, 17-19 сент. 2008 г. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2008. С. 64–66.
4. Пономарев Е.И., Сухинин А.И. Комплексная оценка пожарной опасности и прогнозирование энергетических параметров лесных пожаров с использованием геоинформационных баз данных // Вычисл. технологии. 2000. Т. 5, спецвыпуск. С. 58-68.
5. Софронов М.А. и др. Пожарная опасность в природных условиях. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2005. 330 с.

6. Волокитина А.В. и др. Прогноз поведения лесных пожаров. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2010. 211 с.
7. Белов В.В. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы (Satellite Monitoring of Forest Fire in Russia. Results. Problems. Perspectives): Аналит. Обзор. ИОА СО РАН. ГПНТБ; Новосибирск, 2003. Сер. Экология. Вып. 70 135 с.
8. Смагин В.Н. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 334 с.
9. Ponomarev Ye.I., Sukhinin A.I. Methods for mapping and medium-range forecasting of fire danger in forests on the basis of weather conditions //Mapping Sciences and Remote Sensing. 2003. Vol. 40, N 4. P. 304-310.

Численное моделирование движения газа в пористых средах с очагами гетерогенного горения

Н.А. Луценко

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток

Введение

Процессы горения в пористых средах достаточно распространены в природе. К пористым средам с точки зрения механики можно отнести грунты, торф, горные породы, завалы разрушенных зданий и так далее. Таким образом, очаги горения в пористых средах могут возникать, например, при разрушении зданий и сооружений в результате катастроф и сопровождающихся пожарах, при торфяных пожарах, а также при подземных взрывах и пожарах, возникающих при добыче полезных ископаемых. В последнее время ведутся активные исследования по применению идей фильтрационного горения в различных технологических процессах: разрабатываются принципы сжигания твердых бытовых и промышленных отходов, газификации различных твердых топлив в режиме фильтрационного горения со сверхadiaбатическим разогревом.

Математическое моделирование фильтрационного горения базируется, как правило, на использовании законов сохранения энергии и массы, классического уравнения фильтрации (закона Дарси), уравнения состояния совершенного газа и ряда замыкающих соотношений [1]. Имеется огромное количество публикаций, посвященных как горению твердых пористых сред, так и горению газов в фильтрационном режиме, в частности работы [2, 3, 10, 12-16].

Настоящая работа посвящена исследованию нестационарных течений газа в пористых объектах с очагами гетерогенного горения при заданном давлении на границах объекта и неизвестном расходе газа, проходящего через объект. Достоинством предложенной математической модели является то, что она позволяет описывать процессы не только вынужденной фильтрации, но и естественной конвекции, когда при горении в пористом объекте происходит саморегуляция расхода проходящего через него газа. Для исследования описываемых предложенной моделью процессов разработан численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно разностных схем. Этот метод является развитием вычислительного алгоритма, который ранее успешно применялся для расчета течений газа через пористые объекты с источниками тепловыделения при известном перепаде давлений на входе и на выходе из объекта [4-9]. С помощью вычислительного эксперимента исследован ряд одномерных нестационарных задач гетерогенного горения в пористом объекте.

Математическая модель и численный метод

Рассмотрим однородный неподвижный пористый объект, с боков ограниченный непроницаемыми нетеплопроводными стенками, а сверху и снизу открытый (рис. 1). В результате протекания химической реакции в твердой фазе происходит выделение тепла. В нижнюю часть объекта подается холодный газ, который движется снизу вверх через пористую среду и вытекает в свободное пространство с заданным давлением. Следует заметить, что хотя рассматриваемая физическая модель достаточно простая, тем не менее математическая модель и численный метод, описываемые ниже, могут применяться также для исследования пористых объектов сложной конфигурации.

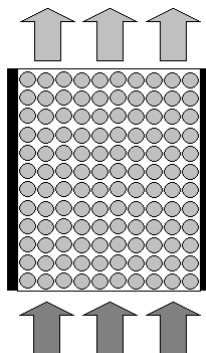
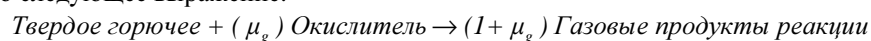


Рис. 1. Пористый объект.

Предположим, что твердое пористое вещество состоит из горючего и инертного компонента, при этом твердое горючее вещество в результате реакции с газообразным окислителем превращается в газ, то есть справедливо следующее выражение:



Здесь и далее μ_g – массовый стехиометрический коэффициент для окислителя.

Модель строится в предположении взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [11] с использованием классических подходов теории фильтрационного горения [1]. В уравнении энергии для твердой компоненты кроме происходящего в результате реакции тепловыделения учитывается также теплопроводность и межфазный теплообмен, интенсивность которого предполагается пропорциональной разности фазовых температур в точке среды. В уравнении энергии для газа теплопроводность не учитывается из-за ее малости, а также предполагается, что гомогенные реакции не происходят. Для описания динамики газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое является более корректным, чем классическое уравнение Дарси. Твердая фаза предполагается неподвижной, поэтому уравнение движения для нее вырождается. В модели учитывается изменение объема и массы фаз при взаимодействии, наличие диффузии окислителя, а также полагается справедливость уравнения состояния совершенного газа. Процессы горения описываются одностадийной химической реакцией первого порядка. Так как в [4, 5] показано, что учет температурной зависимости вязкости газа при его движении через пористую тепловыделяющую среду может изменять решение не только количественно, но и качественно, то динамическая вязкость газа предполагается зависящей от температуры по формуле Сазерленда. Таким образом, система уравнений, моделирующая нестационарные течения газа в пористом объекте с очагами гетерогенного горения, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 (\rho_{cf} c_{cf} + \rho_{ci} c_{ci}) \frac{\partial T}{\partial t} &= -\alpha(T - T_g) + Q_0 \rho_{cf0} W + (1-a) \lambda \Delta T, \\
 \rho c_p \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) T_g \right) &= \alpha(T - T_g), \\
 \rho(1 + \chi(1-a)) \left(\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) \mathbf{v}_g \right) &= -a \nabla p + \rho \mathbf{g} - a^2 \frac{\mu}{k_1} \mathbf{v}_g - \rho_{cf0} W \mathbf{v}_g, \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_g) &= \rho_{cf0} W, \quad p = \rho R T_g / (a \cdot M), \\
 \rho \left(\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) C \right) &= \nabla \cdot (\rho D_g \nabla C) - \mu_g \rho_{cf0} W - \rho_{cf0} W C, \\
 D_g &= D_{g0} (T_g / 273)^b, \quad W = (1 - \eta) C k \exp(-E / (RT)), \\
 \frac{\partial \eta}{\partial t} &= W, \quad \rho_{cf} = (1 - \eta) \rho_{cf0}, \quad a = a_0 + a_{f0} \eta, \quad \mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь и далее a – пористость; a_0 – начальная пористость; a_{f0} – начальная объемная концентрация горючего компонента конденсированной фазы; b – показатель степени в выражении для коэффициента диффузии; C – массовая концентрация окислителя в газовой смеси (т.е. кислорода); c_{cf} – теплоемкость горючего компонента конденсированной фазы; c_{ci} – теплоемкость инертного компонента конденсированной фазы; c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении; c_{s1} и c_{s2} – константы в формуле Сазерленда; D_g – коэффициент диффузии газа; D_{g0} – константа в выражении для коэффициента диффузии; E – энергия активации; g – ускорение силы тяжести; k – предэкспоненциальный множитель в выражении для скорости реакции; k_1 – коэффициент проницаемости конденсированной фазы; M – молярная масса газа; p – давление газа; Q_0 – тепловой эффект реакции; R – универсальная газовая постоянная; t – время; T – температура конденсированной фазы; T_g – температура газа; \mathbf{v}_g – скорость газа; W – скорость обобщенной одностадийной химической реакции; α – константа, определяющая интенсивность межфазного теплообмена; η – степень превращения горючего компонента конденсированной фазы; λ – теплопроводность конденсированной фазы; μ – динамическая вязкость газа; ρ – эффективная плотность газа; ρ_{cf} – эффективная плотность горючего компонента конденсированной фазы; ρ_{cf0} – эффективная начальная плотность горючего компонента конденсированной фазы; ρ_{ci} – эффективная плотность инертного компонента конденсированной фазы; χ – коэффициент присоединенной массы, учитывающий инерционное взаимодействие фаз при их ускоренном относительном движении.

На входе в пористый объект (на его нижней границе) известны температура газа и давление. На выходе (верхней границе) известно давление, так как истечение газа происходит в открытое пространство. Известны также условия теплообмена на входе и выходе из пористого объекта и на ограничивающих непроницаемых стенках. Отличительной особенностью рассматриваемой модели

является то, что расход и скорость фильтрации газа на входе в пористый объект неизвестны и должны определяться при решении задачи. Таким образом, краевые условия для системы (1) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} p|_{x \in G_1} &= p_0(x), \quad \lambda \partial T / \partial n|_{x \in G_1} = \beta(T_{g0} - T|_{x \in G_1}), \\ T_g|_{x \in G_1} &= T_{g0} \text{ и } C|_{x \in G_1} = C_0, \text{ если } \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} \leq 0, \\ \partial T_g / \partial n|_{x \in G_1} &= 0 \text{ и } \partial C / \partial n|_{x \in G_1} = 0, \text{ если } \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} > 0, \\ \partial T / \partial n|_{x \in G_2} &= 0, \quad \partial T_g / \partial n|_{x \in G_2} = 0, \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_2} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_2} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь G_1 – открытые в атмосферу поверхности объекта; G_2 – непроницаемые поверхности объекта; n – вектор, направленный из объекта наружу по нормали к G_1 или к G_2 ; β – коэффициент теплоотдачи; p_0 , T_{g0} и C_0 – соответственно давление, температура газа и массовая концентрация окислителя в газовой смеси в окрестности объекта.

Система уравнений (1), моделирующая нестационарные течения газа в пористом объекте с очагами гетерогенного горения, является нелинейной смешанной гиперболически-параболической системой уравнений и в общем случае не может быть решена аналитически. Для исследования описываемых предложенной моделью процессов разработан оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно разностных схем. Этот метод есть результат развития вычислительного алгоритма, который ранее успешно применялся для расчета течений газа через пористые объекты с источниками энерговыделения при известном перепаде давлений на входе и на выходе из объекта [4–9]. Уравнения энергии, сохранения импульса и концентрации окислителя, согласно методу, преобразуются в явные конечно-разностные уравнения, из которых определяются температура газа, температура твердой среды, скорость газа и массовая концентрация окислителя. Уравнение неразрывности сводится к неявному конечно-разностному уравнению, из которого, с учетом уравнения состояния совершенного газа, вычисляется давление газа. Плотность газа и остальные искомые величины определяются тривиально. Достоинством предложенного численного метода является отсутствие необходимости решения сложных систем алгебраических уравнений, благодаря чему, используя геометрическую декомпозицию, возможно легкое и эффективное распараллеливание алгоритма.

Одномерные нестационарные режимы фильтрационного горения

Рассмотрим следующую одномерную нестационарную задачу гетерогенного горения в пористой среде. Пусть давление на верхней границе пористого объекта соответствует атмосферному давлению, а давление на нижней границе либо соответствует атмосферному давлению (случай естественной конвекции), либо более высокое (случай принудительной фильтрации). До начального момента времени движение газа в объекте отсутствует и его температура равна температуре окружающей среды T_{g0} . В начальный момент времени в очаге возгорания, расположенном либо в нижней части объекта, либо в его центре, температура твердой фазы достигает значения T_0 , равного или превосходящего температуру самовоспламенения $T_{кр}$, и начинается горение. Система (1) с граничными условиями (2) решается в безразмерных переменных, которые вводятся следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x / H, \quad \tilde{t} = t / t_*, \quad \tilde{\mathbf{v}}_g = \mathbf{v}_g / v_*, \\ \tilde{p} &= p / p_*, \quad \tilde{\rho} = \rho / \rho_*, \quad \tilde{T} = T / T_*, \quad \tilde{T}_g = T_g / T_*, \end{aligned}$$

где H – высота объекта; t_* и v_* – характерные значения времени и скорости газа; p_* , ρ_* , T_* – давление, плотность и температура газа при «нормальных» условиях; $\tilde{\rho}_{cf} = \rho_{cf} / \rho_{cf0}$; $\tilde{W} = W / k$; $\tilde{D}_g = (T_* / 273)^{-b} D_g / D_{g0}$; знак тильды « $\tilde{}$ » далее опускается.

В расчетах будем использовать следующие значения параметров:

$$\begin{aligned} H &= 10 \text{ м}, \quad t_* = 60 \text{ с}, \quad v_* = 1 \text{ м/с}, \quad T_* = 300 \text{ К}, \quad p_* = 10^5 \text{ Па}, \quad \rho_* = 1.2 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_{cf0} &= 1.1 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_{ci} = 6.6 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3, \quad c_{cf} = 1.84 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ c_{ci} &= 1.84 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ \alpha &= 10^3 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad c_p = 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad c_{s1} = 1.458 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \sqrt{\text{К}}), \quad c_{s2} = 110.4 \text{ К}, \\ g &= 9.8 \text{ м/с}^2, \quad \lambda = 1.2 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad \beta = 10 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad R = 8.31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}, \\ k &= 3.16 \cdot 10^7 \text{ 1/с}, \quad Q_0 = 8 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \quad E = 110 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}, \quad D_{g0} = 1.82 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \\ b &= 1.724, \quad \mu_g = 2.667, \quad a_0 = 0.3, \quad a_{f0} = 0.1, \quad \chi = 0.5, \end{aligned}$$

и безразмерные краевые условия:

$$T_{g0} = 1 \text{ и } C_0 = 0.23.$$

Будем также считать, что при температурах твердой среды ниже температуры самовоспламенения $T_{кр} = 1.8$ экзотермические реакции не происходят.

Проведенные расчеты показали, что при принудительной фильтрации газа с давлением на входе в объект равном 1.1 атмосфере волна горения возникает и устойчиво распространяется при расположении зоны поджигания как в нижней части объекта, так и в центральной части.

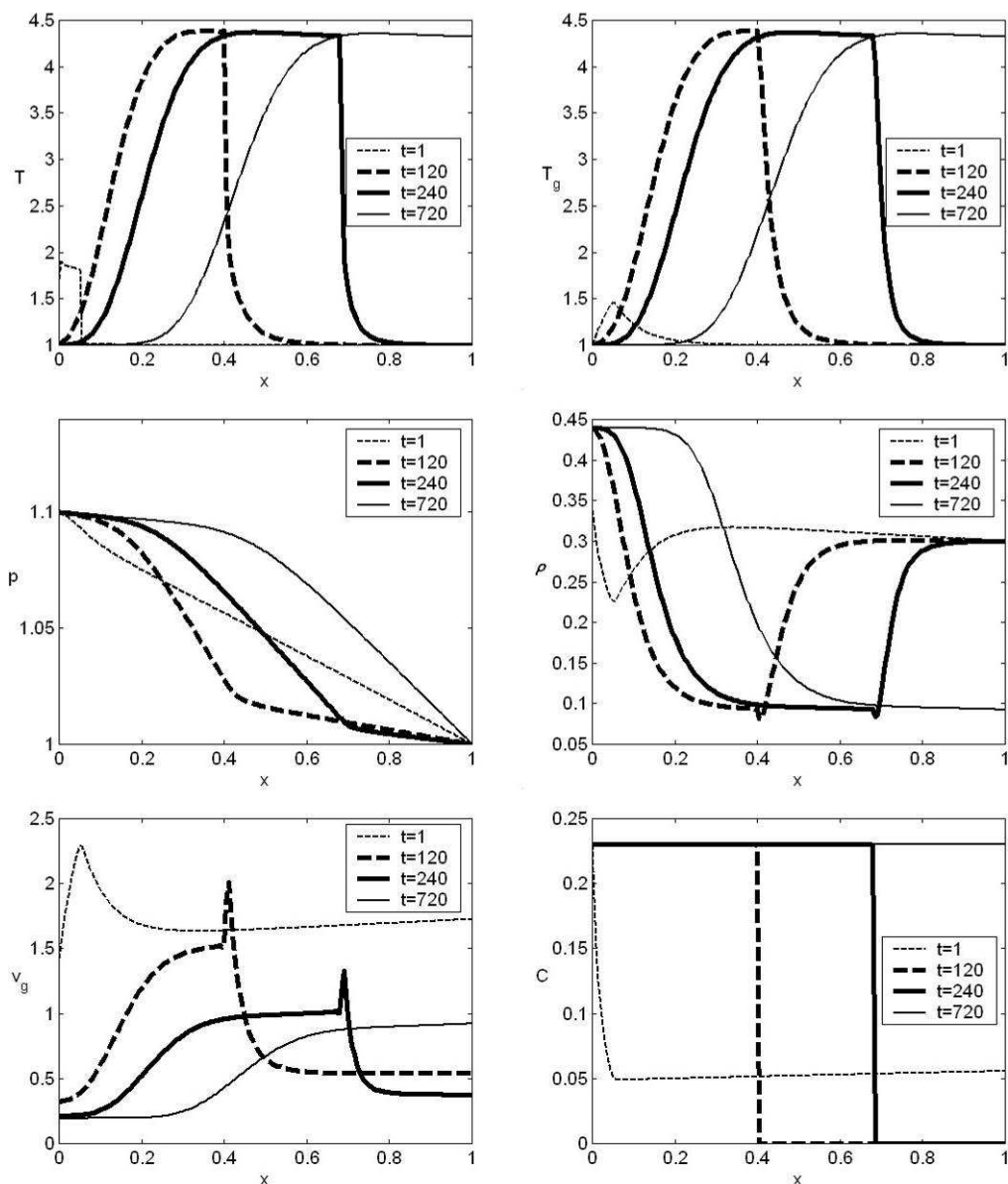


Рис. 2. Распределение температуры твердой среды, температуры газа, давления, эффективной плотности газа, скорости газа и массовой концентрации окислителя в пористом объекте в различные моменты времени.

На рис. 2 показан пример распределения температуры твердой среды, температуры газа, давления, эффективной плотности газа, скорости газа и массовой концентрации окислителя в рассматриваемом пористом объекте в различные моменты времени при расположении зоны поджигания в нижней части объекта. Как видно из рисунка, волна горения возникает и устойчиво распространяется, замедляя свою скорость с течением времени. В зоне горения скорость газа имеет ярко выраженный максимум, а эффективная плотность газа – слабо выраженный минимум. После того, как волна горения проходит через весь пористый объект, выжигая все твердое горючее вещество, процесс горения прекращается и начинается медленное остывание пористого объекта.

При естественной конвекции, когда давление на нижней границе пористого объекта соответствует атмосферному давлению, волна горения организуется в гораздо меньшем диапазоне параметров, чем при принудительной фильтрации. Это объясняется тем, что возникновение волны горения, как и ее скорость, существенно зависят от притока окислителя. Однако при определенных параметрах при естественной

конвекции также наблюдается образование и распространение волны горения. Этот процесс происходит чрезвычайно медленно – время развития и распространения горения составляет десятки суток.

Вычислительный эксперимент также показал, что возникновение волны горения при определенных параметрах зависит от размера зоны поджигания. При этом зажигание внутри пористого объекта более эффективно, чем поджигание на его входной поверхности. Это связано с одной стороны с меньшим оттоком тепла внутри объекта и соответственно с лучшим прогревом твердой фазы, а с другой стороны – с более высокой скоростью газа, а соответственно и с лучшим притоком окислителя при поджигании внутри объекта.

Заключение

Предложена математическая модель для исследования нестационарных течений газа в пористых объектах с очагами гетерогенного горения при заданном давлении на границах объекта. Для исследования описываемых предложенной моделью процессов разработан оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно разностных схем. Используемый подход позволяет решать задачи фильтрационного горения как при вынужденной фильтрации газа, так и при естественной конвекции. С помощью вычислительного эксперимента исследованы одномерные нестационарные процессы гетерогенного горения в пористом объекте. Показано, что волна горения в пористой среде может возникать при определенных параметрах даже при естественной конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант № МК-2198.2011.1), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-01-90004-Бел-а), Дальневосточного отделения РАН (гранты №№ 09-И-ОЭМПУ-04, № 09-И-П2-05, № 11-III-B-01I-011), Федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (госконтракт № 14.740.12.0835).

Литература

1. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9-52.
1. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ, 2002. 203 с.
2. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газов // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 3. С. 44-51.
3. Левин В.А., Луценко Н.А. Возникновение неустойчивых режимов охлаждения пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях // Горение и плазмохимия. 2005. Т. 3, № 2. С. 81-90.
4. Левин В.А., Луценко Н.А. Течение газа через пористую тепловыделяющую среду при учете температурной зависимости вязкости газа // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79, № 1. С. 35-40.
5. Левин В.А., Луценко Н.А. Численное моделирование двумерных нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11, № 6. С. 44-58.
6. Левин В.А., Луценко Н.А. Движение газа через пористые объекты с неравномерным локальным распределением источников тепловыделения // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 3. С. 407-417.
7. Левин В.А., Луценко Н.А. Нестационарные течения газа через осесимметричные пористые тепловыделяющие объекты // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, № 3. С. 26-44.
8. Луценко Н.А. Нестационарные режимы охлаждения пористого тепловыделяющего элемента // Математическое моделирование. 2005. Т. 17, № 3. С. 120-128.
9. Минаев С.С., Потытняков С.И., Бабкин В.А. О неустойчивости фронта пламени при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 49-54.
10. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.
11. Салганский Е.А., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Моделирование горения углерода в фильтрационном режиме // Химическая физика. 2006. Т. 25, № 10. С. 83-91.
12. Салганский Е.А., Кислов В.М., Глазов С.В. и др. Фильтрационное горение системы углерод – инертный материал в режиме со сверхадиабатическим разогревом // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 3. С. 30-38.
13. Aldushin A.P., Matkowsky B.J., Schult D.A. Upward buoyant filtration combustion // Journal of Engineering Mathematics. 1997. Vol. 31. P. 205-234.
14. Aldushin A.P., Rumanov I.E., Matkowsky B.J. Maximal Energy Accumulation in a Superadiabatic Filtration Combustion Wave // Combustion and flame. 1999. Vol. 118. P. 76-90.
15. Babkin V.S., Korzhavin A.A., Bunev V.A. Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media // Combustion and Flame. 1991. Vol. 87. P. 182-190.

Влияние формы вертикальных подвижек дна на образование поверхностных волн

Л. В. Надкритичный

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток

Введение

В работе рассматривается моделирование волн цунами в открытом океане. Образование цунами в первую очередь связывают с сейсмическими движениями дна, оползнями и обвалами, подводными вулканическими извержениями. Но наиболее частой причиной возникновения цунами являются резкие вертикальные смещения дна океана на больших площадях во время сильных подводных землетрясений [6]. При моделировании образования крупных волн в океане подвижками дна зачастую не рассматривают процесс генерации напрямую, а считают, что остаточные деформации дна возникают мгновенно, причем полагают, что с подвижкой дна образуется возмущение водной поверхности, полностью соответствующее деформации дна [2]. Влияние же движения дна на образование волн, например, рассматривается в [11], где также отмечено, что моделирование образования волн цунами статистической деформацией водной поверхности не является адекватным и не может описать картину явления полностью. В отличие от [11], в данной работе рассматриваются волны, образованные при подъеме подводных гор различной формы, когда часть донной поверхности поднимается выше начального невозмущенного уровня водной поверхности. Подобные горные образования в океане широко распространены [5]. Примерами таких подводных образований могут служить гайоты [12] и кальдеры [7]. Как известно [10], подводное препятствие в виде подводной горы или холма может сильно исказить движущуюся над ним волну, работая как волнорез. Надводное же, то есть выступающее на водной поверхности, препятствие по сути представляет собой урез, через который не проходят волны. В данной работе рассматриваются волны, образованные такими «препятствиями».

На несовершенство традиционного способа задания начального условия в задачах генерации волн цунами вертикальными подвижками дна, то есть на некорректность переноса деформации дна на поверхность указывают, например, [6,11]. В принципе, это вполне очевидный факт, поскольку движение дна происходит не мгновенно, а за определенное время ΔT , причем этот промежуток времени может быть больше, чем время, за которое возмущение выходит из очага волнообразования:

$$\Delta T > P = 0.5\sqrt{S/g(H-h)}, \text{ где } \sqrt{S} - \text{длина подвижного участка дна (} S - \text{его площадь), } H - \text{глубина}$$

водного слоя, h – высота поднятия дна ($h < H$). Подвижка может представлять собой не плоский участок, а иметь сложную форму в виде локальных пиков и каверн вплоть до того, что необходимо рассматривать группу подвижных близкорасположенных объектов. При значениях h близких или даже больше H величина P может превосходить ΔT , причем возможен феномен осушения части дна с появлением границ вода-суша, то есть возникновение «островов» с прилегающими мелководными участками и внутренними водоемов. При h , близких к H , возмущение, движущееся вдоль \sqrt{S} , сильно искажается, например, в [10] показано, как кардинально трансформируются волны, проходящие над неглубоко затопленными объектами. Результирующие волны на подобной картине будут разительно отличаться от волн, получающихся при распаде деформированной водной поверхности в традиционной постановке.

Методика

Рассматривается осесимметричное течение идеальной несжимаемой жидкости, ограниченной снизу дном Γ_0 , заданным функцией $z = -b(r, t)$, сверху – свободной поверхностью Γ_f , описываемой функцией $z = \eta(r, t)$, где $t \geq 0$ – время, и осью симметрии Γ_1 с абсциссой $r = 0$. Где r, z – координаты точек в цилиндрической системе координат с вертикальной осью Oz и горизонтальной осью Or , лежащей на невозмущенной свободной поверхности жидкости (рис. 1).

Модель строится с использованием безразмерных величин. Обезразмеривание проводится по следующим формулам:

$$(\tilde{r}, \tilde{z}, \tilde{v}, \tilde{b}) = (r, z, v, b) / H_0, \quad \tilde{t} = t\sqrt{g/H_0}, \quad \tilde{u} = u/\sqrt{gH_0},$$

где H_0 – характерная глубина слоя жидкости, g – ускорение свободного падения. Символом «~» отмечены безразмерные величины; при последующем изложении он будет опущен. При указанном обезразмеривании критериями подобия являются: $L = A_b / H_0$ – отношение линейных размеров и число Фруда $F = V_b / \sqrt{gH_0}$. Величины A_b и V_b – это максимальная высота подъема горы и постоянная скорость ее роста, соответственно. L определяет уровень, до которого поднимается подводная гора,

причем $L > 1$ соответствует случаю, когда пик горы выступает выше начального невозмущенного уровня жидкости.

Форма дна задается следующим образом:

$$b(r, t) = \begin{cases} 1 - [tF + \mu] \cdot B_i(r), & t \leq (L - \mu) / F, \\ 1 - L \cdot B_i(r), & \text{иначе,} \end{cases}$$

где функции $B_i(r)$ описывают основные формы рассматриваемых подводных гор ($i = 1, 2, 3$), μH_0 – начальная (минимальная) высота подводной горы. Поскольку рассматривается подводный объект, то задается коэффициент $\mu = 0.75$.

Для удобства используются функции:

$$\text{функция Хевисайда: } \theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0; \end{cases}$$

$$\text{абсолютное значение: } ABS(x, \varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{1 - \varepsilon / 2} \frac{x^2}{2\varepsilon}, & |x| \leq \varepsilon, \\ \frac{1}{1 - \varepsilon / 2} \left[|x| - \frac{\varepsilon}{2} \right], & \text{иначе.} \end{cases}$$

Тогда $B_i(r)$ можно записать как:

$$B_i(r) = \theta\left(\frac{\gamma\beta_i - r}{\beta_i}\right) \theta\left(\frac{r - \delta\beta_i}{\beta_i}\right) \left[1 - (1 - \alpha) ABS\left(\frac{r - \gamma\beta_i}{(\delta - \gamma)\beta_i}, \varepsilon\right) \right] + \\ + \alpha \theta\left(\frac{\delta\beta_i - r}{\beta_i}\right) + \theta\left(\frac{\beta_i - r}{\beta_i}\right) \theta\left(\frac{r - \gamma\beta_i}{\beta_i}\right) \left[1 - ABS\left(\frac{r - \gamma\beta_i}{(1 - \gamma)\beta_i}, \varepsilon\right) \right].$$

Параметры α , δ , γ определяют форму подводных объектов, причем $B_i(r)$ при $\alpha = 1$ и $\delta = \gamma = 0$ описывает простую остроконечную гору, а $B_i(r)$ при $\alpha = 1$ – форму гайота, при иных значения параметров $B_i(r)$ описывает форму кальдеры (рис. 1). В расчетах используются следующие значения параметров: для простой горы – $\alpha = 1$, $\delta = \gamma = 0$; для гайота – $\alpha = 1$, $\delta = 0$, $\gamma = 0.9$; для кальдеры – $\alpha = 0.9$, $\delta = 0.8$, $\gamma = 0.9$. Параметр $\varepsilon = 0.01$ необходим, чтобы немного сгладить склон.

Коэффициенты ширины подводной горы β_i (т. е., $\beta_i H_0$ – это ширина основания подводной горы) задаются таким образом, чтобы объемы

$$V_i(t) = 2\pi [tF + \mu] \int_0^{\beta_i} r B_i(r) dr = 2\pi [tF + \mu] D_i$$

были равны для всех объектов, т. е. $V_1 = V_2 = V_3$ или $D_1 = D_2 = D_3$. Поскольку

$$D_1 = \frac{1}{6} \beta_1^2, \quad D_2 = \frac{1}{6} \beta_2^2 (1 + \gamma + \gamma^2), \quad D_3 = \frac{1}{6} \beta_3^2 (\alpha \delta^2 - \delta^2 + 1 + \gamma(1 - \delta + \alpha \delta) + \alpha \gamma^2),$$

то в качестве общего коэффициента ширины выбирается $\beta = \beta_1 = 5$, исходя из [5], и тогда

$$\beta_2 = \frac{\beta}{\sqrt{1 + \gamma + \gamma^2}}, \quad \beta_3 = \frac{\beta}{\sqrt{\alpha \delta^2 - \delta^2 + 1 + \gamma(1 - \delta + \alpha \delta) + \alpha \gamma^2}}.$$

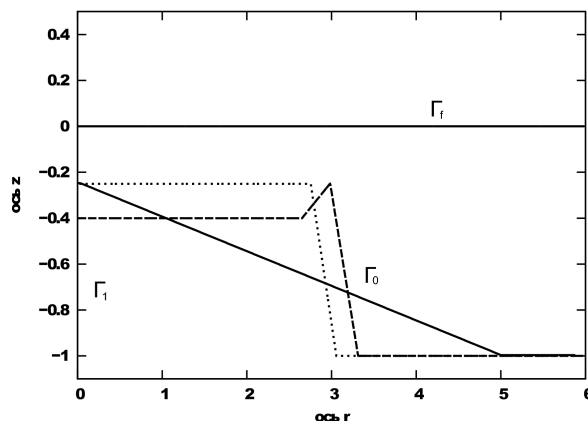


Рис. 1. Расчетный бассейн. Формы подводных гор: сплошная линия – остроконечная вершина, пунктир – гайот, штриховая линия – кальдера.

Стоит заметить, что $\beta_1 > \beta_3 > \beta_2$ и, таким образом, наибольший уклон склона $\frac{\partial b}{\partial r}$ по всем типам гор принадлежит гайоту:

$$\max \left\{ \frac{L}{\beta_1}, \frac{L}{(1-\gamma)\beta_2}, \frac{L}{(1-\gamma)\beta_3} \right\} = \frac{L}{(1-\gamma)\beta_2}.$$

Для моделирования течения жидкости используются уравнения мелкой воды в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} \eta_t + Q_r = -\frac{Q}{r}, \\ Q_t + (Q \cdot u)_r = -\frac{Q \cdot u}{r} - H\eta_r - k \cdot u|u|, \\ H = \eta + b, Q = H \cdot u, \end{cases}$$

где Q – расход жидкости; u – скорость жидкости; η – уровень свободной поверхности; H – полная глубина; $k \cdot u|u|$ – сила трения, следующая из формулы Шези [3]. Трение необходимо, чтобы гасить катящиеся волны (rolling waves), образующиеся на склоне гор, причем коэффициент «шероховатости» k (коэффициент Шези) задается из условия:

$$k > \frac{1}{4} \frac{\partial b}{\partial r} = \frac{1}{4} \max \left\{ \frac{L}{\beta_1}, \frac{L}{(1-\gamma)\beta_2}, \frac{L}{(1-\gamma)\beta_3} \right\} = \frac{L}{4(1-\gamma)\beta_2} = \hat{k},$$

что гарантирует отсутствие катящихся волн на склоне подводных гор. В расчетах значение коэффициента выбрано следующим: $k = 1.1 \cdot \hat{k}$.

При значении L близком или больше 1 возможно осушение части дна. Для учета осушения в расчетах используется прием, описанный в [14].

В начальный момент времени $t = 0$ жидкость покоится ($u(r,0) = 0$) и ограничена сверху невозмущенной свободной поверхностью $\eta(r,0) = 0$, а снизу начальным уровнем дна $z = -b(r,0)$. На оси симметрии Γ_1 ставится граничное условие: $u(0, t \geq 0) = 0$. Область считается неограниченной, поэтому на внешней стенке задается условие свободного прохождения: $Q(r_{ext}, t) = \sqrt{H(r_{ext}, t)} \cdot \eta(r_{ext}, t)$, $t \geq 0$ [8], где $r_{ext} > \beta$ – внешняя стенка.

Численное решение представлено на разностной сетке типа «С» по классификации Аракавы с использованием явной TVD схемы первого порядка точности по пространству и времени [4,9]. Условие отсутствия нефизических осцилляций и условие устойчивости в этой схеме совпадают и определяются из условия Куранта-Фридрихса-Леви: $C \cdot \Delta t / \Delta r < 1$ (где C – характерная скорость). Шаг по времени Δt определяется на каждом временном слое исходя из этого условия.

Результаты

В работе рассматриваются следующие понятия. Во-первых, три типа подводных образований: остроконечная вершина, гайот, кальдера. Проводится сравнение изменения уровня жидкости для случаев с указанными типами образований. Поскольку показать весь процесс на графиках не представляется возможным, то в тексте даются пояснения рассматриваемых событий.

Во-вторых, модельные параметры: L и F . Если с параметром L все ясно: $L < 1$ – подводный объект не достигает начального уровня свободной поверхности, $L \geq 1$ – достигает или выступает выше; то для значений F нужно сделать определенные пояснения. В литературе (например, [6]) указывается, что период движения дна в реальных величинах составляет более 100 секунд. При глубине водного слоя в 1 км безразмерный период составит более 10. В данной работе время движения дна явно не указано, оно определяется из отношения параметров F и L , а именно: $T = (L - \mu) / F$. Например, исходя из значений $T = 20$ и $L = 1$, получаем $F = 1.25 \cdot 10^{-2}$. В расчетах используются значения $10^{-2} \leq F \leq 10^{-1}$, $0.9 \leq L \leq 1.1$.

Рассмотрим динамику волнообразования для трех типов подводных гор. На графиках рис. 2,а представлены мареограммы – графики уровней свободной поверхности в некоторых точках расчетной области – в точках $r = 0$, $r = 3$, $r = 8$, то есть в точках центра, склона и на удалении от подводных объектов, для $L = 0.9$ и $F = 10^{-1}$.

До момента остановки движения дна ($t = 1.5$) в $r = 0$ происходит равномерный рост свободной поверхности, причем значения $L - \mu = 0.15$ достигается только для гайота. Это связано с тем, что возмущение водного слоя передается по направлению от склона к центру со скоростью $c = \sqrt{1 - \mu}$, которое проходит плоский участок гайота за время $\tau = \gamma \beta_2 / c \approx 5.5 > t$. Для кальдеры ситуация

аналогичная, но возмущение идет от ее пика с большей скоростью $c = \sqrt{1 - \alpha\mu}$, из-за чего уровень свободной поверхности в ее центре ниже, чем у гайота. На графике кальдеры виден локальный максимум, связанный с наличием пика (в следствие центральной симметрии правильно говорить кольцо, но будет упоминаться пик кальдеры) – возмущение, двигаясь по склону пика к центру, ускоряется, а после резко замедляется на горизонтальном участке, из-за чего возрастает амплитуда возмущения. Таким образом, для случая кальдеры образуется внутренний водоем, в котором возникают свои режимы течения. В случае остроконечной вершины уровень свободной поверхности над ее вершиной равномерно понижается в плоть до ее обмеления.

На графике остроконечной вершины в $r = 0$ виден резкий всплеск, вызванный затоплением пика волной отражения. Впоследствии пик горы остается затопленным. Ни для гайота, ни для кальдеры подобный всплеск не наблюдается, поскольку обмеления не достигается ни в один момент времени. На графике кальдеры различимы локальные максимумы, один из которых указан выше, это связано с волновым движением во внутреннем водоеме. Стоит заметить, что для случая кальдеры уровень жидкости падает быстрее, чем для случая гайота. В последующие моменты времени водный уровень в $r = 0$ постепенно понижается во всех случаях.

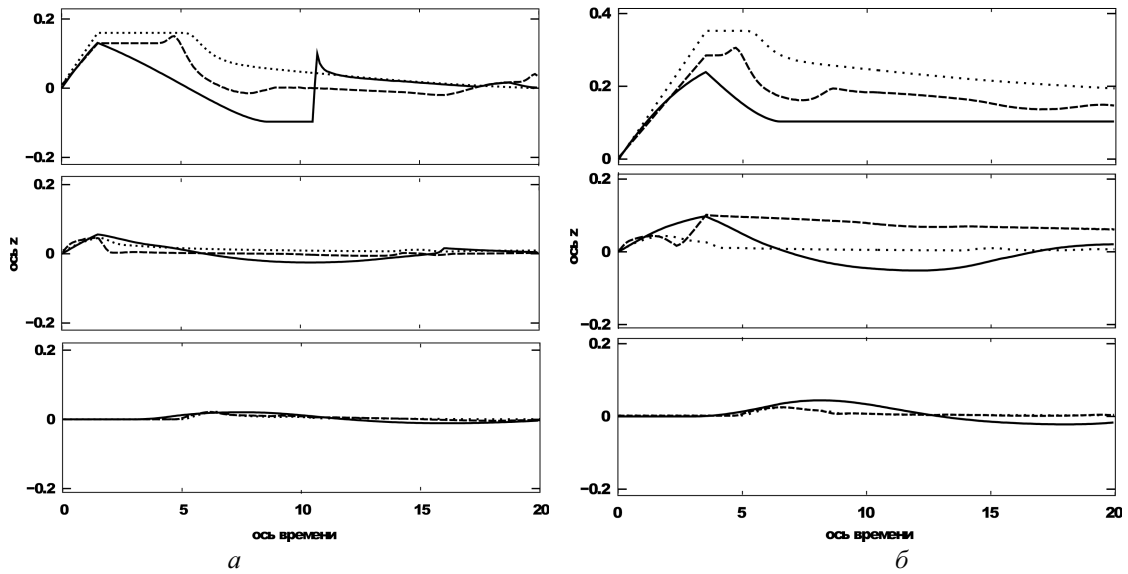


Рис. 2. Изменение уровня свободной поверхности. $a - F = 10^{-1}, L = 0.9$; $b - F = 10^{-1}, L = 1.1$.
Сверху вниз: в точках $r = 0, r = 3, r = 8$. Обозначение линий – как на рис. 1.

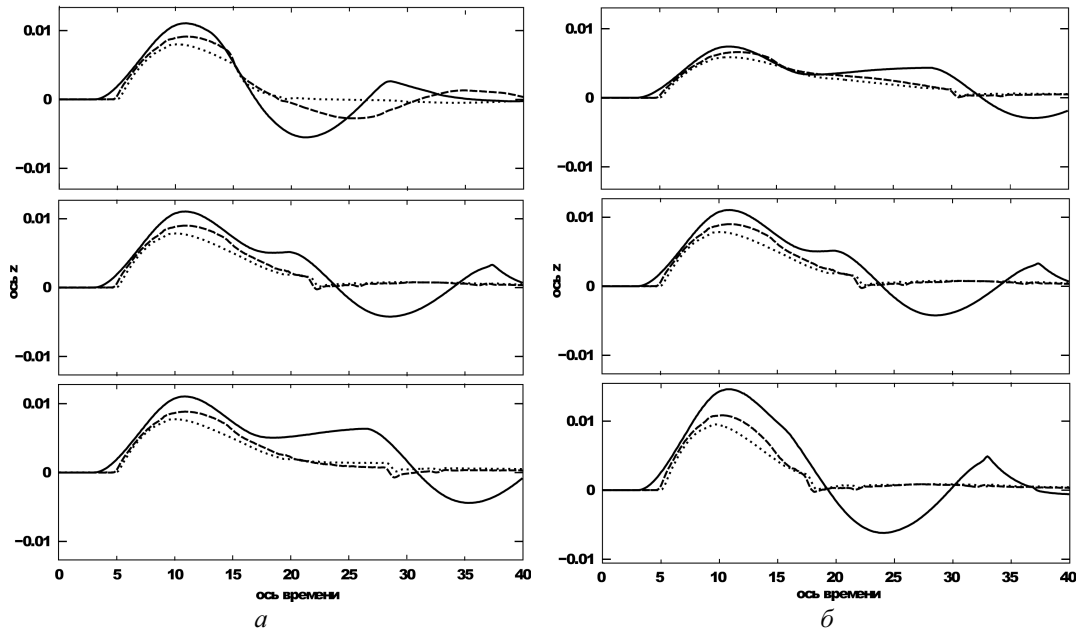


Рис. 3. Изменение уровня свободной поверхности в точке $r = 8$. $a -$ при $F = 1.5 \cdot 10^{-2}$ (сверху вниз: $L = 0.9, L = 1.0, L = 1.1$); $b -$ при $L = 1.0$ (сверху вниз: $F = 10^{-2}, F = 1.5 \cdot 10^{-2}, F = 2 \cdot 10^{-2}$).
Обозначение линий – как на рис. 1.

Близ склона (в точке $r = 3$) водный уровень для всех типов гор ведет себя схоже: в процессе движения дна постепенно повышается, а затем происходит плавное понижение. Значительно отличается поведение свободной поверхности в случае кальдеры: уровень свободной поверхности резко падает после остановки движения дна. Тем самым пик кальдеры вносит свой вклад в течение: пик снижает поток и гасит возмущения из внутреннего водоема.

Образованные в результате волны можно видеть на мареограммах в точке $r = 8$. Интересно то, что уровень свободной поверхности для кальдеры и гайота совпадают хоть их значения и сильно разнятся в $r = 0$ и $r = 3$. Также видно, что результирующая волна образуется для случая остроконечной вершины раньше, чем в остальных случаях. Для кальдеры и гайота наблюдается локальный максимум (горб) на передней части волны, такая неоднородность вызвана тем, что часть водного слоя захватывается кальдерой и гайотом. Таким образом, результирующая волна не отражает форму источника, как гайота или кальдеры.

Рассмотрим результаты расчета с параметрами $F = 10^{-1}$, $L = 1.1$, то есть для случая, когда подводная гора выступает выше начального уровня свободной поверхности. На рис. 3 представлены мареограммы расчета с новыми значениями параметров в тех же точках. Поскольку объем жидкости, вытесненный движением подводной горы, будет больше, чем для предыдущего случая, то и амплитуда возмущений значительно больше. Теперь длительность подвижки дна составляет $t = (L - \mu) / F = 3.5$, до этого момента водный уровень для кальдеры и гайота равномерно повышается, поскольку возмущение от склона еще не дошло до $r = 0$. С остроконечной вершины возмущение начинает сходить еще до остановки движения дна. В целом картина в $r = 0$ при $L = 0.9$ и $L = 1.1$ качественно выглядят схоже за исключением того, что в данном случае обмеляются все три типа вершин, отсутствует повторное затопление остроконечной вершины. Но обмеление кальдеры и гайота возникает намного позже образования волны в их случаях, в случае же остроконечной вершины результирующая волна образуется еще до обмеления вершины, что видно на мареограммах в точках $r = 0$, $r = 8$.

В точке $r = 3$ для параметров $L = 0.9$ и $L = 1.1$ отличается поведение водного уровня в случае кальдеры: при $L = 1.1$, как и при $L = 0.9$, уровень падает, но позже резко возрастает и медленно понижается. Опять же, вносит свой вклад пик кальдеры: до момента $t = (1 - \mu) / F = 2.5$ водный уровень ведет себя также, как и в случае $L = 0.9$, после часть водного слоя запирается во внутреннем водоеме, внешний склон обмеляется, и уровень жидкости на нем поднимается равномерно вместе с дном. В случае гайота и остроконечной вершины различия при $L = 0.9$ и $L = 1.1$ имеют только количественный характер.

Рассмотрим результирующие волны, а именно графики изменения уровня свободной поверхности во внешней точке $r = 8$, при различных значениях модельных параметров. Графики представлены на рис. 4 и 5. Прежде всего, на графиках видно, что амплитуда и длина волн для гайота и кальдеры меньше, чем для остроконечной вершины. Более того, мареограммы кальдеры и гайота в большинстве случаев качественно совпадают, лишь, как ни странно, амплитуда в случае гайота меньше, чем для кальдеры. Если форма волны для гайота и кальдеры представляет собой уединенную волну, то в случае остроконечной вершины образуется волна сложной конфигурации: наблюдаются несколько локальных максимумов. Это связано с тем, что при некоторых значениях модельных параметров пик остроконечной вершины осушается и повторно затопляется, тем самым создавая широкую область возмущения. Для остроконечной вершины характерно наличие волны понижения, которая не наблюдается для гайота и кальдеры.

По мареограммам на рис. 4 и 5 видно, что при увеличении значения L амплитуда волны увеличивается незначительно, заметно возрастает длина волны. Наоборот же, при увеличении значений F амплитуда волны возрастает, а ее длина уменьшается. Если говорить в общем, то на «катастрофичность» результирующей волны сказывается период движения дна $T = (L - \mu) / F$, как можно ожидать: чем он меньше, тем крупнее волны образуются. В крайнем случае, при $T = 0$, возникают самые крупные волны, что соответствует традиционному подходу к моделированию подобного явления, но не отвечает действительности.

Заключение

Проведенные численные расчеты показали, что при вертикальном движении подводных гор образуются волны, причем для остроконечной вершины, гайота и кальдеры имеются различия как в эпицентре, так и в результирующих волнах. В эпицентре волнообразования, то есть непосредственно над подводным объектом, течение различается при движении всех трех типов объектов. Результирующие волны для гайота и кальдеры практически совпадают – амплитуда для гайота незначительно меньше, чем для кальдеры. Волны, образованные движением остроконечной горы, сильно отличаются от оных для кальдеры и гайота: из-за относительно быстрого осушения вершины остроконечной горы и ее последующего затопления возникшие волны имеют сложную структуру в виде нескольких горбов, также наличествует волна понижения, не присутствующая для случаев гайота и кальдеры.

Показано различие результирующих волн для различных значений модельных параметров L , F , то есть высоты поднятия подводного объекта и скорости этого поднятия. Замечено, что совместное влияние параметров в виде $T = (L - \mu) / F$ – периода движения дна – сказывается следующим образом: уменьшение периода приводит к возникновению наиболее крупных волн. Причем по отдельности увеличение L лишь немного увеличивает амплитуду результирующей волны, но заметно увеличивается длина волны. Увеличение значения F приводит к значительному росту амплитуды волны и уменьшению ее длины.

При сравнении результирующих волн для случаев гайота и кальдеры отмечено, что результирующая волна не отражает форму источника волнообразования. Заметное отличие от предыдущих двух случаев наблюдается для случая остроконечной вершины: из-за быстрого осушения и повторного затопления пика результирующая волна значительно отличается по форме. Критерий осушения $L > 1$ для случаев гайота и кальдеры сказывается только на течении непосредственно над подводным объектом. Для случая остроконечной вершины при L , близком или больше 1, возможно осушения вершины с последующим затоплением и возникновением результирующей волны сложной конфигурации.

В данной постановке задачи наиболее катастрофичными являются волны, образованные при вертикальном движении остроконечной вершины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-01-98510р_восток_а) и Дальневосточного отделения РАН (грант № 09-И-П17-03).

Литература

1. Dotsenko S.F., Soloviev S.L. On the role of residual displacements of ocean bottom in tsunami generation by underwater earthquakes // *Oceanology*. 1995. Vol. 35, N 1. P. 20-26.
2. Kowalik Z., Knight W., Logan T., Whitmore P. Numerical modeling of the global tsunami: Indonesian tsunami of 26 December 2004 // *Science of Tsunami Hazards*. 2005. Vol. 23, N 1. P. 40-56.
3. Stoker J.J. *Water waves. The mathematical theory with applications*. N.Y.: Institute of mathematical sciences, New York University, 1957. 600 p.
4. Yee H.C., Warming R.F. Implicit Total Variation Diminishing (TVD) Schemes for Steady-State Calculations // *Journal of Computational Physics*. 1985. Vol. 57, N 3. P. 327-360.
5. Жулева Е.В. Объемы вулканических гор как фактор, определяющий формирование морфоструктуры ложа океана // *Океанология*. 2010. Т. 50, № 1. С. 114-120.
6. Левин Б.В., Носов М.А. *Физика цунами и родственных явлений в океане*. М.: Янус-К, 2005. 360 с.
7. Ломтев В.Л., Гуринов М.Г. Экструзии (плюмы) охотской окраины Курильской дуги близ кальдеры Львиная пасть (о-ва Итуруп) // *Литосфера*. 2008. № 1. С. 124-132.
8. Марчук Ан.Г., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.Н. *Численное моделирование волн цунами*. Новосибирск: Наука, 1983. 175 с.
9. Мезингер Ф., Аракава А. *Численные методы, используемые в атмосферных моделях*. – Ленинград.: Гидрометеоздат, 1979. 135 с.
10. Надкриничный Л.В. Численное исследование генерации поверхностных волн и прохода волн над подводным препятствием // *Математическое моделирование*. 2010. Т. 22, № 2. С. 148-160.
11. Носов М.А., Колесов С.В. Метод постановки начальных условий в задаче численного моделирования цунами // *Вестник Московского Университета*. 2009. Сер. 3: Физика, Астрономия. № 2. С. 96-99.
12. Рашилов В.А., Новикова П.Н., Долгаль А.С. Подводящие каналы гайотов Вулканолог и Коцебу (Магеллановы горы, Тихий океан) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009. Т. 13, № 1. С. 98-106.
13. Роуч П. *Вычислительная гидродинамика*. М.: Мир, 1972. 600 с.
14. Федотова З.И. Обоснование численного метода для моделирования наката длинных волн на берег // *Вычислительные технологии*. 2002. Т. 7, № 5. С. 58-76.

Функциональное моделирование процесса поддержки принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования

Л.Ф. Ноженкова, К.В. Бадмаева, А.А. Мельник, Р.В. Морозов

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск
Сибирский филиал Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России

Введение

Создание управляющей системы поддержки принятия решений при угрозах пожарной безопасности (ПБ) на объектах сферы науки и образования является объективной необходимостью и инновационным шагом в области обеспечения пожарной безопасности [1]. Первым этапом моделирования является построение концептуальной модели системы и ее формализация. Результат концептуализации проблемной области фиксируется в виде наглядных графических схем на функциональном уровне моделирования. Данная статья посвящена описанию функционального моделирования процесса поддержки принятия решений.

Для описания функциональной модели информационно-управляющей системы поддержки принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности используется методология функционального моделирования и графической нотации – IDEF0. Такая технология создания модели выбрана, поскольку она наилучшим образом соответствует поставленной задаче и позволяет построить модель, адекватную предметной области на всех уровнях абстрагирования, за счет функциональной декомпозиции фрагментов системы с самого верхнего уровня и проверки диаграмм экспертами предметной области.

Процесс поддержки принятия решений при возникновении угроз ПБ

Информационно-управляющая система обеспечивает поддержку принятия решений при возникновении угроз ПБ путем формирования информации о моделировании пожаров и эвакуации в здании, выдачи рекомендаций по минимизации пожарного риска. Информационная поддержка осуществляется за счет визуальной демонстрации пожара и эвакуации (рис. 1).



Рис. 1. Диаграмма декомпозиции процесса «Поддержка принятия решений при возникновении угроз ПБ».

Входными данными для процесса на рассматриваемой диаграмме декомпозиции являются параметры моделирования. Параметры моделирования – набор геометрических и функциональных параметров объекта защиты, характеристик угроз ПБ необходимых для расчета развития пожара, эвакуации людей и для статистического исследования процесса эвакуации в заданном интервале времени. Процесс формирования параметров для моделирования развития полей опасных факторов пожара (ОФП), эвакуации и исследования процесса эвакуации в течение заданного интервала времени включает: определение характеристик сценария пожара, определение характеристик сценария эвакуации, определение характеристик работы системы противопожарной защиты, определение параметров расчета для исследования процесса эвакуации. Подробно параметры моделирования рассмотрены в работе [1].

Для выполнения процесса используются база данных и база знаний, а также нормативная документация, которая является руководством и ограничением действий. База данных содержит информацию об объекте, результатах моделирования и нормативных документах по ПБ. База знаний включает в себя формализованные знания экспертов и результаты анализа нормативной документации по ПБ, а также правила формирования рекомендаций.

Сформированный отчет по результатам моделирования позволяет увидеть проблему безопасности в целом и в частности, что дает специалисту предметной области принимать более обдуманные и

обоснованные решения. Ранжирование по заданному приоритету сформированных рекомендаций по проведению противопожарных мер позволяет лучше ориентироваться в их разнообразии.

Моделирование развития пожара и эвакуации людей для получения оценок рисков и рекомендаций по проведению противопожарных мер

Диаграмма декомпозиции процесса «Моделирование развития пожара и эвакуации людей для получения оценок рисков и рекомендаций по проведению противопожарных мер» (рис. 1) представлена на рис. 2.

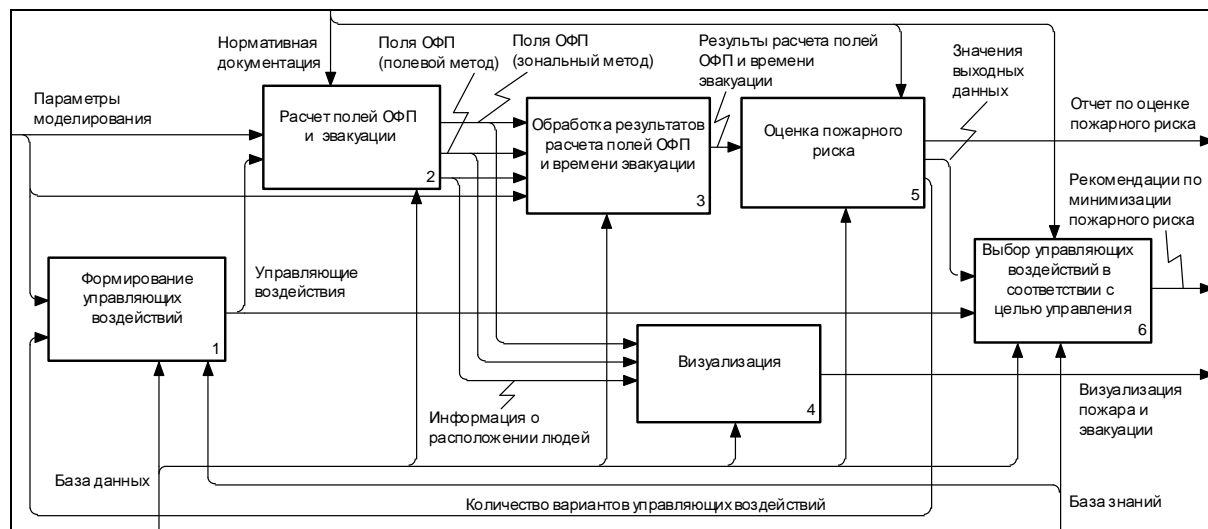


Рис. 2. Диаграмма декомпозиции процесса «Моделирование развития пожара и эвакуации людей для получения оценок рисков и рекомендаций по проведению противопожарных мер».

Процесс «Формирование управляющих воздействий» на основе информации о заданных параметрах моделирования пользователем и результатах расчета ОФП, эвакуации и оценки рисков формирует новые управляющие воздействия, выбирая из базы данных управляющие переменные и их возможные значения, при этом, исключая уже промоделированные варианты управляющих воздействий.

Первоначально процесс «Расчет полей ОФП и эвакуации» выполняется со значениями параметров моделирования, заданными пользователем, для формирования рекомендаций осуществляется повторное выполнение процесса с автоматически заданными управляющими воздействиями. Результаты расчета полей ОФП и времени эвакуации используются для оценки пожарного риска [2]. На основе информации о результатах моделирования и управляющих воздействий в процессе «Выбор управляющих воздействий в соответствии с целью управления» выполняется выбор управляющих воздействий из общего множества примененных вариантов управления. Представление результатов моделирования осуществляется процессом «Визуализация».

Формирование управляющих воздействий

В соответствии с диаграммой декомпозиции процесса «Моделирование развития пожара и эвакуации людей для получения оценок рисков и рекомендаций по проведению противопожарных мер» выбор и установка значений управляющих параметров для моделирования выполняется подпроцессом «Формирование управляющих воздействий» (рис. 2). Входные данные: информация о параметрах моделирования, заданных пользователем и о количестве управляющих воздействий, при установке которых моделирование еще не было выполнено. На основе информации базы данных и базы знаний осуществляется формирование новых значений управляющих воздействий с возможным сокращением пространства поиска.

Управляющие воздействия оказывают непосредственное влияние на результат моделирования, устанавливая конкретные значения управляющих параметров системы. Управляющими параметрами системы являются переменные, изменение значений которых влияет на конечный результат. Поскольку каждый объект защиты (здание), для которого выполняется моделирование развития ОФП и эвакуации, имеет свои специфические свойства, выделяются основные и дополнительные управляющие параметры. Основные управляющие параметры необходимы для выполнения моделирования и оценки рисков для всех зданий. Дополнительные управляющие параметры позволяют конкретизировать процесс моделирования, осуществляют уточнение результатов расчета и обеспечивают возможность формирования более частных рекомендаций.

Основные параметры: время обнаружения возгорания, время начала эвакуации, количество людей в здании, пожарная нагрузка, характеристики путей эвакуации, характеристики работы системы

противопожарной защиты. Основные параметры являются обязательными для выполнения моделирования и их эталонные значения задаются в соответствии с нормативной документацией [2].

Дополнительные параметры предназначены для более детального моделирования и требуют пояснения, поскольку их значение может быть установлено произвольно для демонстрации последствий нарушения требований ПБ.

Обученность людей определяет поведение людей в процессе эвакуации при возникновении угроз ПБ: человек, участвующий в процессе эвакуации проинструктирован о расположении эвакуационных выходов и в случае возникновения угрозы ПБ направляется к ближайшему из них, человек, участвующий в процессе эвакуации не проинструктирован о расположении эвакуационных выходов и в случае возникновения угрозы ПБ направляется к главному выходу.

Расположение мебели определяет расположение объектов мебели внутри помещений здания. Расположение мебели зависит от характеристик эвакуационных путей и принимает значения всех возможных перестановок объектов мебели в помещениях здания. Вариантами расположения мебели могут являться: расстановка мебели на момент осмотра здания, расстановка мебели экспертом, расстановка мебели пользователем.

Состояние эвакуационных выходов определяет возможность эвакуации через запасные выходы в случае возникновения угрозы ПБ и представляет собой явное нарушение НПБ в случае, если выходы закрыты. Соответственно данный параметр принимает значения: «эвакуационные выходы открыты» и «эвакуационные выходы закрыты».

Состояние доводчиков на дверях определяет условия безопасной эвакуации, поскольку не закрывающиеся двери способствуют более быстрому распространению ОФП. Данный параметр принимает значения: «доводчики функционируют» и «доводчики не функционируют».

Состояние двустворчатых дверей определяет условия безопасной эвакуации, поскольку, закрытые на одну створку двери уменьшают количество людей одновременно проходящих в данный проем, способствуют скоплению людей и увеличивают время эвакуации.

Количество и размещение противопожарных дверей в здании принимает значения от 0 до количества дверных проемов в здании, куда может быть установлена дверь.

Роли людей в процессе эвакуации определяют действия людей, занимающих определенные должности, и руководствующихся существующими предписаниями в инструкции по ПБ здания.

Организованная эвакуация включает в себя разделение потоков людей для оптимизации их распределения по эвакуационным выходам. Значения для данного параметра разрабатываются экспертом.

Тип используемых окон определяет время его разрушения, что соответственно влияет на распространение ОФП. Окна могут быть обычными, жаростойкими, противопожарными и др.

Расчет развития ОФП и моделирование процесса эвакуации

В модель системы включены две модели расчета ОФП и две модели расчета движения людей. Расчет развития ОФП полевым методом без взаимодействия с эвакуацией – выполняется расчет полей ОФП полевым методом, не учитывая действия людей в процессе эвакуации [2]. Расчет развития ОФП полевым методом – расчет развития ОФП осуществляется полевым методом с учетом действий эвакуирующихся людей [3]. Расчет эвакуации полевым методом – выполняется расчет движения людей полевым методом без учета реакции людей на ОФП или с учетом [4]. Расчет развития ОФП зональным методом – выполняется расчет полей ОФП зональным методом [2]. Расчет эвакуации по индивидуально-поточной модели – выполняется расчет движения людей по индивидуально-поточной модели [2].

Результаты расчетов эвакуации и распространения ОФП передаются следующему процессу для обработки и определения временных характеристик – время блокирования эвакуационных путей, время скопления, время эвакуации из контрольных точек и т.п.

Обработка результатов расчета полей ОФП и времени эвакуации

В соответствии с диаграммой декомпозиции процесса «Моделирование развития пожара и эвакуации людей для получения оценок рисков и рекомендаций по проведению противопожарных мер» обработка результатов моделирования выполняется подпроцессом «Обработка результатов расчета полей ОФП и времени эвакуации» (рис. 2).

На основе результатов моделирования эвакуации и развития ОФП осуществляется определение расчетного времени эвакуации и определение времени блокирования эвакуационных путей и времени блокирования. При необходимости определяется информация по заданным пользователям контрольным группам и помещениям. Осуществляется определение числа человек побывавших в зонах критических значений ОФП, определение времени нахождения в зоне с критическими значениями каждого из полей ОФП для каждого человека, определение общего времени нахождения людей в зонах критических значений ОФП и др. Для последующего расчета вероятности эвакуации выполняется определение времени скопления людей.

Оценка пожарного риска

В качестве количественной оценки пожарной опасности исследуемого объекта в модели используется формула расчета пожарного риска, приведенная в [2]. В соответствии с диаграммой декомпозиции (рис. 2) определение расчетных величин пожарного риска выполняется подпроцессом «Оценка пожарного риска».

Расчеты по оценке пожарного риска проводятся путем сопоставления расчетных величин пожарного риска с нормативным значением пожарного риска, установленного Федеральным законом от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». Выполняется проверка соответствия расчетного значения индивидуального пожарного риска требуемому значению, и передача данных для последующего формирования управляющих воздействий и рекомендаций.

Формирование рекомендаций

В соответствии с диаграммой декомпозиции (рис. 2) формирование рекомендаций выполняется подпроцессом «Выбор управляющих воздействий в соответствии с целью управления». В случае если расчетная величина индивидуального пожарного риска превышает нормативное значение, в здании следует предусмотреть дополнительные противопожарные мероприятия, направленные на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре. На основе информации о результатах моделирования по заданным управляющим воздействиям и параметрам моделирования, заданным пользователем, выполняется выбор управляющих воздействий из общего множества примененных вариантов управления, и формируются рекомендации проведения противопожарных мероприятий. Выбор выполняется на основе знаний, хранящихся в базе знаний сформированных в соответствии с результатами проведенных исследований и Методикой определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности [2].

К числу противопожарных мероприятий, направленных на обеспечение безопасной эвакуации людей при пожаре, относятся:

- применение дополнительных объемно-планировочных решений и средств, обеспечивающих ограничение распространения пожара (включая оборудование противопожарными дверями, дверями с функционирующими доводчиками);
- устройство дополнительных эвакуационных путей, отвечающих требованиям безопасной эвакуации людей при пожаре;
- устройство систем оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией людей повышенного типа;
- применение систем противодымной защиты от воздействия опасных факторов пожара;
- ограничение количества людей в здании до значений, обеспечивающих безопасность их эвакуации из здания;
- повышение знаний ПБ и культуры пожарной безопасности, как следствие уменьшение задержки начала эвакуации;
- изменение (снижение) пожарной нагрузки;
- приведение эвакуационных выходов в надлежащее состояние;
- снижение количества людей, одновременно пребывающих в здании, изменение их рассредоточения по зданию;
- освобождение загроможденных участков эвакуационных путей.

Эффективность противопожарных мероприятий определяется степенью влияния на время начала эвакуации, время блокирования эвакуационных путей ОП и расчетное время эвакуации. Эффективность системы пожарной сигнализации, противодымной защиты и системы оповещения людей при пожаре и управления эвакуацией людей определяется условной вероятностью выполнения задачи при пожаре.

Применение в качестве дополнительного противопожарного мероприятия объемно-планировочных решений и средств, обеспечивающих ограничение распространения пожара, достигается обеспечением нормируемых пределов огнестойкости и пониженной пожарной опасности облицовочных строительных материалов, используемых в ограждающих конструкциях помещения, в котором находится вероятный очаг пожара.

Влияние системы противодымной защиты на уровень обеспеченности безопасной эвакуации людей при пожаре оценивается посредством расчета значения времени блокирования эвакуационных путей ОП с учетом технических характеристик применяемого вентиляционного оборудования противодымной защиты. Подбор параметров вентиляционного оборудования осуществляется в соответствии с нормативными документами по пожарной безопасности. При этом для выполнения расчетов следует применять зонную (зональную) или полевую модели.

Ограничение количества людей в здании до значений, обеспечивающих безопасность их эвакуации из здания при пожаре, учитывается посредством повторного расчета значения расчетного времени эвакуации при существующих объемно-планировочных решениях и ограниченном значении количества эвакуирующихся при пожаре.

Для поддержки принятия решений разработаны правила формирования рекомендаций на базе продукций, позволяющие формализовать построение базы знаний и реализовать процедуру логического вывода [5].

Из сформированного системой набора управляющих воздействий, осуществляется выбор ограниченного числа сочетаний, в соответствии с целью управления. Выбранный набор значений управляющих параметров предлагается пользователю в виде отчета с рекомендациями по минимизации пожарного риска.

Визуализация результатов моделирования

Визуализация результатов моделирования выполняется подпроцессом «Визуализация» (рис. 2). Для визуализации результатов моделирования необходима информация о расположении людей и способе их передвижения, физические характеристики людей, состоянии дверей, поля ОФП во времени, расположение мебели. Осуществляется 3D-визуализация распространения каждого из ОФП в отдельности (температура, задымленность, концентрация газов CO, CO₂, HCl), 3D визуализация движения потоков людей, поэтажная визуализация распространения ОФП и эвакуации.

Заключение

Работа выполнена в соответствии с принципами моделирования в IDEF0. Приведены основные диаграммы декомпозиции процесса поддержки принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности. На концептуальном уровне описаны входные и выходные параметры, а также основные подпроцессы, позволяющие достичь цели.

Использование современных технологий поддержки принятия решений и средств 3D-визуализации позволило по-новому подойти к проблеме повышения степени защищенности объектов науки и образования. Предложенная реализация процесса поддержки принятия решения позволяет моделировать процессы распространения опасных факторов пожара и эвакуации людей в приближенных к реальным условиям, оценивать безопасность эксплуатации здания и своевременно принимать решения для снижения влияния рискообразующих факторов и повышения уровня защищенности объектов науки и образования от пожаров.

Полученные результаты удовлетворяют современному мировому уровню в области информационных технологий в применении к вопросам пожарной безопасности, а в ряде аспектов занимают передовые позиции. Создание модели информационно-управляющей системы поддержки принятия решений при угрозах пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования является инновационным шагом в области обеспечения пожарной безопасности.

Литература

1. Ноженкова Л.Ф., Бадмаева К.В., Ничепорчук В.В. и др. Проблемы построения управляющей системы поддержки принятия решений при возникновении угроз пожарной безопасности на объектах сферы науки и образования // Проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2011. № 2. С. 25-33.
2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности: Приказ МЧС России от 30 июня 2009 года; зарег. в Минюсте РФ 06.08.2009. N 14486.
3. Литвинцев К.Ю., Дектерев А.А., Кирик Е.С. и др. Интеграция математических моделей эвакуации и развития пожара // Тр. Междунар. конф. «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика». Новосибирск, Россия, 30 мая – 4 июня 2011 г. № гос. регистр. 0321101160, ФГУП НТЦ «Информрегистр». Новосибирск, 2011. 6с. http://conf.nsc.ru/files/conferences/niknik-90/fulltext/39835/51532/paper_Litvintsev_Kirik.pdf
4. Kirik E., Yurgel'yan T., Malyshev A. On discrete-continuous stochastic floor field pedestrian dynamics model SIGMA.DC // In "Emergency evacuation of people from buildings". 2011. P. 155-161.
5. Бадмаева К.В., Морозов Р.В. Алгоритм формирования рекомендаций по применению мер пожарной безопасности // Информатизация и связь. 2011. Спецвыпуск (в печати).

Математическое моделирование перехода низового лесного пожара в верховой в трехмерной постановке

В.А. Перминов

Беловский институт (филиал) ГОУ ВПО «Кемеровский государственный университет»

Как отмечается в [1,2] наиболее опасным видом лесных пожаров являются верховые лесные пожары. Поэтому изучение данного вида лесных пожаров является актуальным, так как информация о механизмах возникновения и развития верховых лесных пожаров может быть использована при разработке новых способов профилактики и борьбы с ними. В [3,4] рассматривались двумерные постановки, описывающие возникновения верховых лесных пожаров в осесимметричном (отсутствие внешнего поля ветра) и плоском (бесконечная длина фронта низового лесного пожара и конечная ширина) случаях. Данные подходы накладывают существенные ограничения на возможность изучать переход низового лесного пожара в верховой. В реальных условиях очаг низового лесного пожара имеют конечные размеры и в силу неоднородности распределения лесных горючих материалов, фронт низового лесного пожара не представляет собой прямую линию бесконечной длины. Все эти и другие ограничения могут быть сняты, если рассмотреть задачу перехода низового лесного пожара в пространственной трехмерной постановке. Как правило, возгорание в лесах происходит в нижнем ярусе леса в напочвенном покрове (опавшая хвоя, мхи, лишайники, отмершая трава и т.д.), а затем огнем охватывается полог леса, то есть образование верхового лесного пожара происходит в результате перехода низового лесного пожара в верховой [1].

Предполагается, что очаг низового пожара имеет конечные размеры и над пологом леса задана скорость ветра. Начало системы координат $x_1, x_2, x_3 = 0$ связано с очагом низового пожара. Ось Ox_3 направлена вверх, а оси Ox_2 и Ox_1 - параллельно поверхности земли (ось Ox_1 совпадает с направлением ветра). Схема данного процесса представлена на рис. 1.

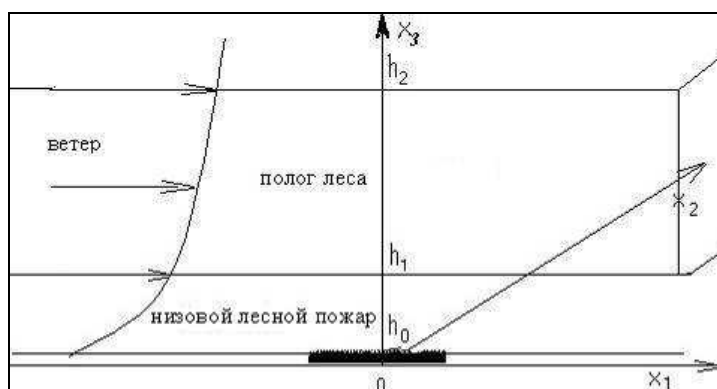


Рис. 1. Схема низового пожара.

Предполагается, что: 1) течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом пренебрегаем, 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука, 3) среда находится в локально-термодинамическом равновесии, 4) известна скорость ветра над пологом леса в невозмущенных условиях, 5) газодисперсная смесь бинарная и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы - компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов. Сформулированная выше задача сводится к решению системы уравнений (1)-(7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = \dot{m}, \quad j = 1, 2, 3, \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_i v_j}) - \rho s c_d v_i |\vec{v}| - \rho g_i - \dot{m} v_i; \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p \overline{v_j T'}) + q_s R_s - \alpha_v (T - T_s) + k_g (c U_R - 4\sigma T^4); \quad (3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_j c'_\alpha}) + R_{s\alpha} - \dot{m} c_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, 5}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - kc U_R + 4k_s \sigma T_s^4 + 4k_g \sigma T^4 = 0, \quad k = k_g + k_s; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \phi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial t} = -R_1, \quad \rho_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial t} = -R_2, \quad \rho_3 \frac{\partial \phi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \quad \rho_4 \frac{\partial \phi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^5 c_\alpha = 1, \quad p_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad \vec{v} = (v_1, v_2, v_3), \quad \vec{g} = (0, 0, g),$$

$$\dot{m} = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3 + R_{54} + R_{55},$$

$$R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5, \quad R_{52} = v_g (1 - \alpha_c) R_1 - R_5, \quad R_{53} = 0, \quad R_{54} = \alpha_4 R_1, \quad R_{55} = \frac{\alpha_5 v_3}{v_3 + v_{3*}} R_3.$$

Для определения скоростей реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса, и летучих продуктов пиролиза используются формулы:

$$R_1 = k_1 \rho_1 \phi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), \quad R_2 = k_2 \rho_2 \phi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right),$$

$$R_3 = k_3 \rho_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), \quad R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right), \quad (8)$$

где $R_1 - R_5, R_{5\alpha}$ – массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования сажи и пепла и образования α -компонентов газодисперсной фазы; c_{pi}, ρ_i, ϕ_i – удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i -ой фазы (1 – сухое органическое вещество, 2 – вода в жидко-капельном состоянии, 3 – конденсированные продукты пиролиза, 4 – минеральная часть, 5 – газовая фаза); T, T_s – температура газовой и конденсированной фаз; c_α – массовые концентрации ($\alpha = 1$ – кислород, 2 – CO, 3 – сажа, 4 – пепел, 5 – инертные компоненты воздуха); P – давление; U_R – плотность энергии излучения; σ – постоянная Стефана – Больцмана; k – коэффициент ослабления излучения; k_g, k_s – коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_v – коэффициент обмена фаз, q_i, E_i, k_i – тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; s_σ – удельная поверхность элемента лесных горючих материалов; M_α, M_c, M – молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s, c_d – удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент полога леса; c – скорость света; v, v_x – проекции скорости на оси где x_i ; α_c, v – коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; \dot{m} – массовая скорость образования газодисперсной фазы; w_* – характерная скорость выдува из очага низового лесного пожара; α_4, α_5 – эмпирические константы; g – ускорение свободного падения.

Система уравнений (1)-(7) описывает процессы переноса в области лесного массива, который включает в себя пространство между подстилающей поверхностью и нижней границей полога леса, полог леса, и пространство над пологом. Термодинамические, теплофизические и структурные характеристики соответствуют лесным горючим материалам (ЛГМ) соснового леса и приведены в [1-3]. В (2)-(4) содержатся члены, связанные с турбулентной конвекцией и нуждаются в замыкании. Компоненты тензора турбулентных напряжений, а также турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты среднего течения согласно [5]. Коэффициент турбулентной динамической вязкости определяется с помощью локально-равновесной модели турбулентности [1].

Считается, что в начальный момент времени параметры состояния среды совпадают с невозмущенными значениями:

$$t = 0: v_i = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{\alpha e}, \quad T_s = T_e, \quad \phi_k = \phi_{ke}, \quad i = 1, 2, 3; \quad \alpha = \overline{1, 5}; \quad k = 1, 2, 3; \quad \alpha = \overline{1, 5}. \quad (9)$$

Граничных условий для уравнения переноса излучения на нижней границе рассматриваемой области на поверхности Земли под пологом леса на напочвенном покрове согласно [3]:

$$-\frac{c}{3\chi} \frac{\partial U_r}{\partial x_3} = \frac{\varepsilon}{2(2-\varepsilon)} (4\sigma T_s^4 - cU_r). \quad (10)$$

На напочвенном покрове задавалась температура очага низового лесного пожара:

$$T_s = \begin{cases} T_e + (T_0 - T_e) \frac{t}{t_0} \exp\{-[r/\Delta]^2\}, t \leq t_0, \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp\{-[(r-r_f)/\Delta]^2\}, t > t_0, \end{cases} \quad (11)$$

где t_0 – время образования очага низового лесного пожара; $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$; Δ – ширина его фронта, а расстояние до центра фронта определяется по формуле $r_f = (t - t_0)\omega$ (ω – скорость распространения фронта низового пожара). Массовая скорость выдува из очага низового лесного пожара определялась из следующего соотношения $(\rho v_3) = h_0 \bar{m}$, где \bar{m} – осредненная по высоте напочвенного покрова h_0 скорость массовыделения газодисперсной смеси. Для массовых концентраций компонентов газодисперсной смеси использовались соотношения

$$-\rho D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} + \rho v_3 c_\alpha = h_0 \bar{R}_{5\alpha}, \quad (12)$$

где $\bar{R}_{5\alpha}$ – осредненная по высоте напочвенного покрова массовая скорость образования α -компонент газодисперсной фазы. Кроме того на всей нижней границе для горизонтальных составляющих скорости ветра задано условие прилипания $v_1, v_2 = 0$. Граничное условие на границе раздела сред (например, на верхней границе полога леса) выводится из соотношения сопряжения падающего лучистого потока на полог леса с потоком, проникающим внутрь полога леса. В случае отсутствия внешнего потока излучения, то есть на верхней границе полога леса при $x_3 = x_{3e}$ имеем граничное условие

$$\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} + c U_R / 2 = 0. \quad (13)$$

Таким образом, на верхней границе полога леса граничные условия будут иметь следующий вид

$$x_3 = x_{3e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} + \frac{c}{2} U_R = 0. \quad (14)$$

Аналогично соотношению (13) граничное условие для U_R на левой границе расчетной области при $x_1 = -x_{1e}$ будет иметь вид

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0$$

Тогда граничные условия будут иметь следующий вид:

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e(x_3), v_2 = 0, v_3 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0. \quad (15)$$

На правой границе расчетной области $x_1 = -x_{1e}$ граничное условие для уравнения переноса излучения будет иметь вид.

$$\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0. \quad (16)$$

Тогда для остальных искомых функций запишем так называемые мягкие граничные условия. Относительно их постановки следует отметить, что использовались так называемые условия "сноса" (равенство нулю первой производной от искомой функции). Такой произвол в постановке граничных условий вызван отсутствием информации о поведении там искомых функций. Тогда граничные условия на правой границе расчетной области можно записать в виде

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0. \quad (17)$$

Подобным образом выводятся граничные условия на входе в рассматриваемую область и выходе по направлению оси Ox_2 , перпендикулярном распространению горения. Граничные условия для U_R можно записать соответственно:

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + c U_R / 2 = 0, \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + c U_R / 2 = 0. \quad (18)$$

И таким образом на входе и выходе в рассматриваемую область по данному направлению граничные условия можно записать соответственно:

$$x_2 = 0: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + c U_R / 2 = 0; \quad (19)$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} + \frac{cU_R}{2} = 0. \quad (20)$$

В случае, если на левой границе задано поле скорости ветра параллельно поверхности земли и очаг низового пожара поместить в начале системы координат, то процесс будет протекать симметрично относительно координатной плоскости Ox_1x_3 и можно рассматривать расчетную область как полупространство. Тогда для проведения более экономичных расчетов граничные условия (19) необходимо заменить на условия симметрии:

$$x_2 = 0: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, v_2 = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial x_2} = 0. \quad (21)$$

Система уравнений (1)-(7) с соответствующими начальными и граничными условиями, приведенными выше, для численного интегрирования редуцирована к дискретной форме с помощью метода контрольного объема [6]. Сеточные уравнения, возникающие в процессе дискретизации, разрешались с помощью метода *SIP* [7]. Алгоритм решения приведенной задачи включает в себя расщепление по физическим процессам, то есть вначале рассчитывалась гидродинамическая картина, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались химические источники для скалярных функций. При этом шаг по времени для интегрирования системы обыкновенных уравнений выбирался автоматически. Согласование полей скорости и давления осуществлялось итерационным образом в рамках алгоритма SIMPLE [6].

В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей твердой фазы в различные моменты времени. Из полученных результатов следует, что с течением времени под действием очага низового лесного пожара возрастают температуры газовой и твердой фаз на нижней границе полого леса (рис. 2), происходит прогрев ЛГМ, испарение влаги, уменьшение объемной доли сухого ЛГМ, увеличение количества летучих горючих продуктов пиролиза, уменьшение массовой концентрации кислорода (рис. 3) и уменьшение объемных долей фаз (рис. 4) вблизи очага низового лесного пожара. Под действием очага повышенной температуры в его окрестности происходит прогрев полого леса, испарение влаги и разложение сухого ЛГМ. На рис. 2-4 представлено изменение температур газовой и твердой фаз, массовых концентраций газовой фазы и объемных долей фаз с течением времени.

В результате этого в пологе леса выделяются летучие горючие продукты пиролиза. Во все время процесса температура газовой фазы выше температуры твердой фазы. Это подтверждает, что конвективный механизм передачи энергии преобладает над радиационным. На рис. 5-7,(a-e) представлены распределения температуры, концентраций кислорода и летучих продуктов пиролиза от момента начала пиролиза ($t = 1.0$) до воспламенения ($t = 1.5$).

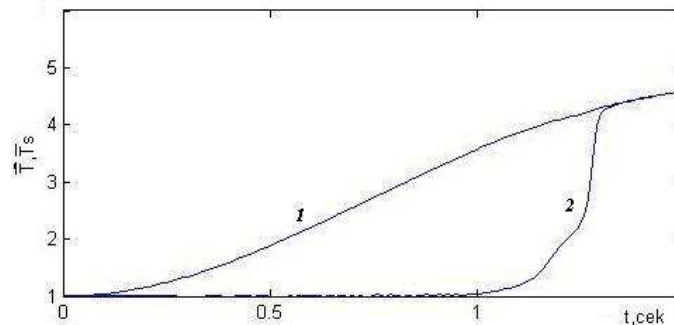


Рис. 2. Температура газовой (1- \bar{T}) и твердой фазы (2- \bar{T}_s); $\bar{T} = T/T_e$, $\bar{T}_s = T_s/T_e$.

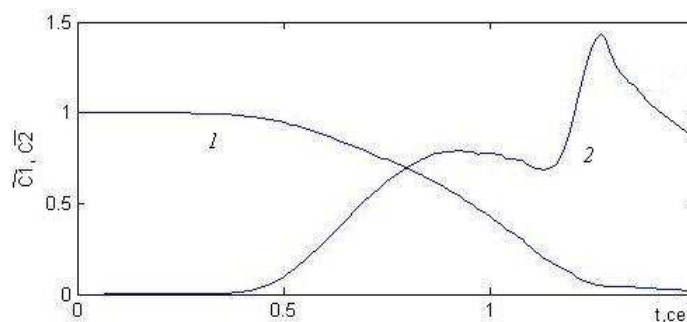


Рис. 3. Массовые концентрации кислорода (1- \bar{C}_1) и летучих горючих продуктов пиролиза (2- \bar{C}_2).

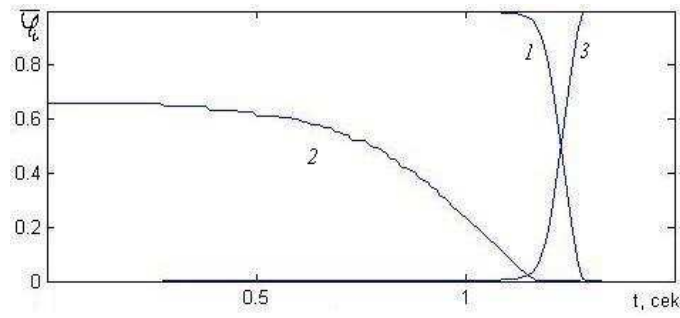


Рис. 4. Изменение объемных долей фаз: $1 - \bar{\phi}_1 = \phi_1 / \phi_{1e}$, $2 - \bar{\phi}_2 = \rho_2 \phi_2 / \rho_c$, $3 - \bar{\phi}_3 = \rho_3 \phi_3 / \alpha_c \rho_1 \phi_{1e}$.

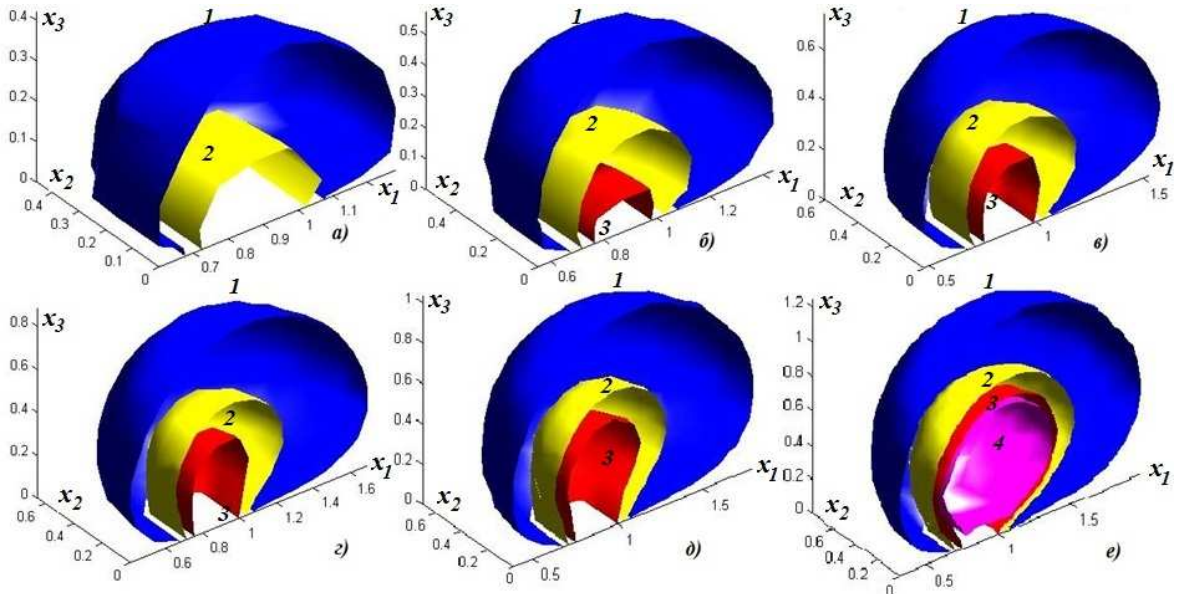


Рис. 5. Распределение изоповерхностей температуры \bar{T} (1 - 1.1; 2 - 2.; 3 - 3.; 4 - 4).

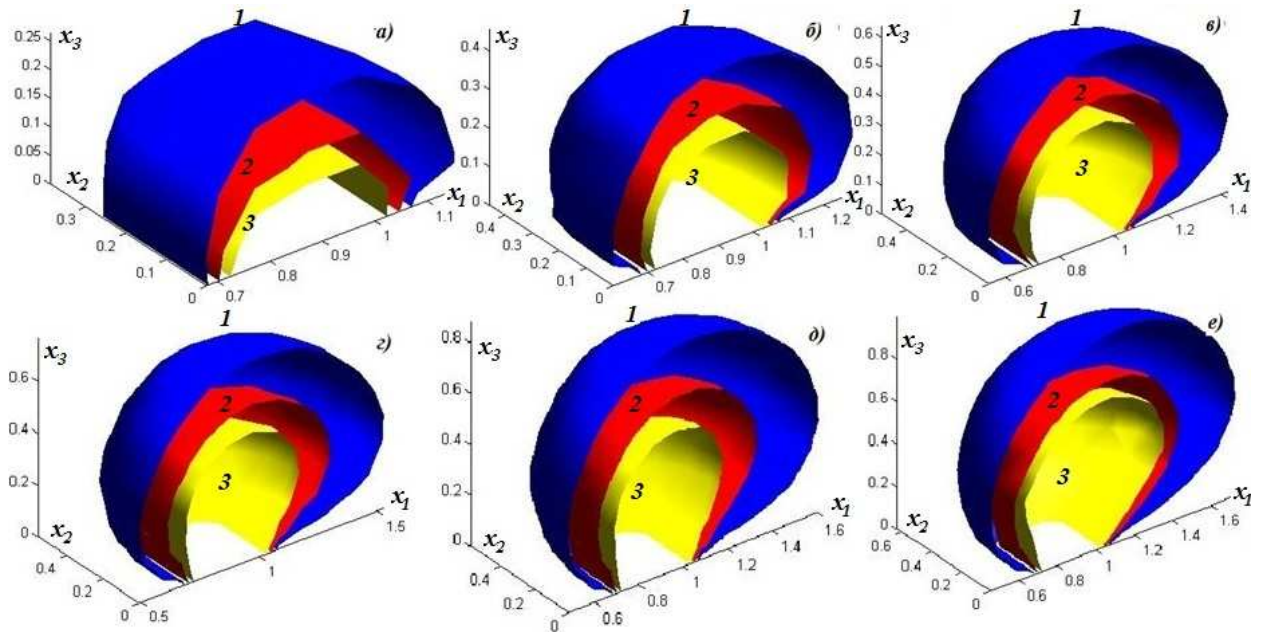


Рис. 6. Распределение изоповерхностей кислорода \bar{C}_1 (1 - 0.9; 2 - 0.7; 3 - 0.5).

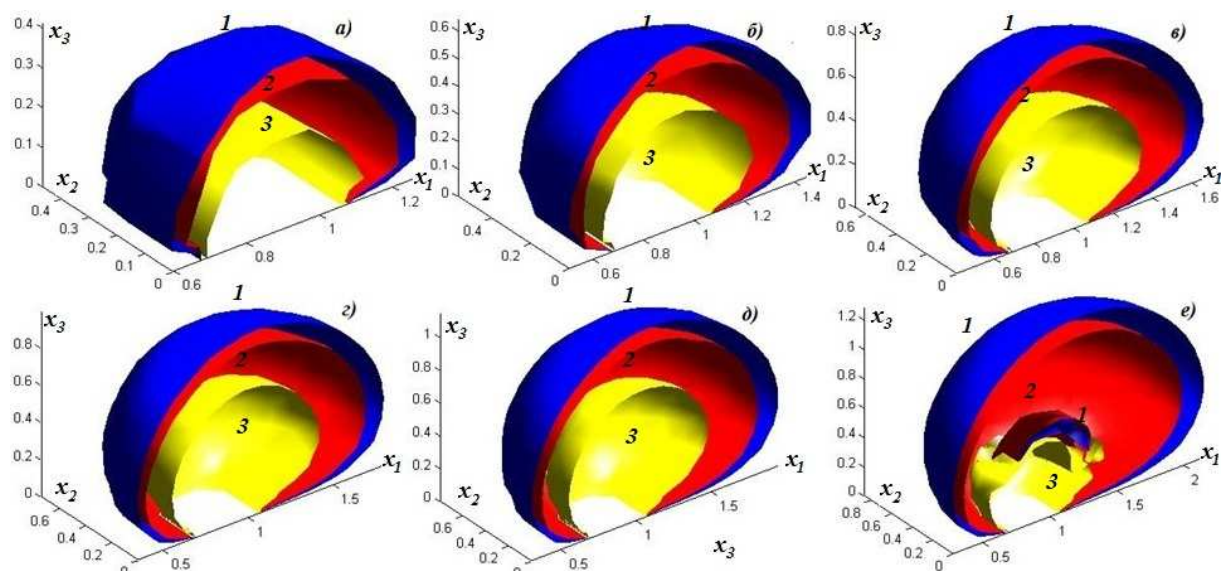


Рис. 7. Распределение изоповерхностей летучих продуктов пиролиза (1- 0.05; 2 - 0.1; 3 - 0.5).

Газообразные продукты пиролиза, выделившиеся в результате разложения ЛГМ, воспламеняются в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом и происходят их выгорание (снижение концентрации) на нижней границе полога леса. При этом также происходит уменьшение концентрации кислорода. Начиная с момента зажигания, температуры газовой и конденсированной фаз становятся одинаковыми.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ-Кузбасс (грант № 10-01-98000).

Литература

1. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука. 1992.
2. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. 1977.
3. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения массовых и верховых лесных пожаров с учетом радиационно-конвективного теплопереноса и двухтемпературности среды. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 1995. 188 с.
4. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания крон деревьев // ФГВ. 1998. Т. 34. С. 13-22.
5. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука. 1965.
6. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Stone H.L. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations // SIAM Journal of Numerical Analysis. 1968. Vol. 5. P. 530-558.

Течение неоднородного газа в подземном газификаторе

М.С. Родина

Кемеровский государственный университет

Газификация угля – производство горючего (технологического) газа при неполном окислении органической массы угля, имеет давнюю историю с периодами бурного развития и спадами. Подземная газификация угля осуществляется под действием высокой температуры (1000-2000 °С) и подаваемого под давлением дутья – различных окислителей (как правило, воздуха, O_2 и водяного пара, реже – CO_2) [1,2].

Первоначально производят бурение двух скважин (наклонных или вертикальных), затем выработки соединяются между собой горизонтальным каналом, называемым огненным штреком. Для создания горизонтального канала используются такие методы как прожиг, гидравлический разрыв, наклонно-горизонтальное бурение, шахтный метод и др. После розжига горение распространяется по угольной поверхности огненного штрека. Процесс газификации осуществляется нагнетанием дутья(воздуха) в одну скважину и отводом образующегося газа из другой. Горящая поверхность угольного пласта называется огненным забоем. Сечение огненного штрека остается практически одинаковым, а поверхность забоя – свободной для доступа дутья. Поток, омывая поверхность огненного забоя, газифицирует уголь с образованием горючего газа.

В отличие от газификации угля в наземных условиях выделяют ряд особенностей:

1. Расстояния между скважинами в угольном пласте во много раз превышает необходимую длину зон реагирования.

Отсутствуют газонепроницаемые стенки, поэтому в процессе газообразования участвует не только влага угля, но и влага вмещающих пород, а также гравитационные подземные воды.

Отсутствует движение топлива

Реакционный канал непосредственно граничит с массой угля, что приводит к термоподготовке угольного пласта.

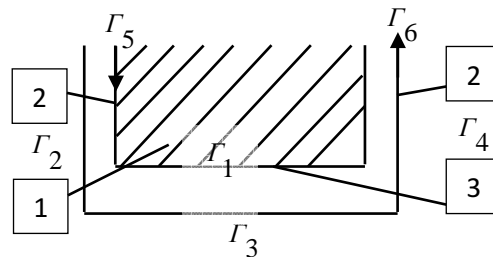


Рис. 1. Схема подземного генератора. 1 – пласт угля; 2 – скважины; 3 – фронт.

Движение неоднородного сжимаемого газа в подземном генераторе опишем следующей системой уравнений с заданными краевыми условиями:

- уравнение сохранения энергии:

$$\rho(x, y, t) \cdot C_p \cdot \left(\frac{\partial T(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right) + \sum_{i=3}^6 q_i p_i,$$

$$T|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6} : \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad T|_{\Gamma_1} = T_1(x, y, t), \quad T|_{\Gamma_5} = T_5(x, y, t);$$

- уравнение состояния газовой фазы:

$$P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu};$$

- уравнения движения Навье – Стокса:

$$\rho(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial U(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial U(x, y, t)}{\partial y} \right),$$

$$\rho(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial V(x, y, t)}{\partial t} + U(x, y, t) \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} + V(x, y, t) \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right) + \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial V(x, y, t)}{\partial y} \right),$$

$$V|_{\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4} = U|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4} = 0, \quad U|_{\Gamma_5, \Gamma_6} = 0, \quad V|_{\Gamma_1} = V_1(x, y, t), \quad V|_{\Gamma_5} = V_5(x, y, t), \quad V|_{\Gamma_6} = V_6(x, y, t);$$

- уравнение неразрывности газовой смеси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0, \quad \rho|_{\Gamma_5} = \rho_5(x, y, t), \quad \rho|_{\Gamma_6}: \frac{\partial \rho}{\partial y} = \beta(\rho - \rho_{аммс}), \quad \rho|_{\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5}: \frac{\partial \rho}{\partial n} = 0,$$

где $\rho(x, y, t)$ и $P(x, y, t)$ – плотность и давление газовой смеси; $T(x, y, t)$ – температура; $U(x, y, t)$ и $V(x, y, t)$ – скорости по осям X и Y соответственно; μ – вязкость, λ и C_p – теплопроводность и удельная теплоемкость смеси газов; $\sum_{i=3}^6 q_i p_i$ – тепловые эффекты химических реакций.

На прямоугольной области Ω введем сетку с шагами h_x по оси $0x$ и h_y по $0y$. Введем τ – шаг по времени, затем аппроксимируем системы соответствующими центральными разностями. Сохраняя порядок уравнений, будем считать системы, полученные из уравнений сохранения энергии и движения Навье–Стокса, методом продольно-поперечной прогонки, полученную из уравнения неразрывности газовой смеси – схемой с разностями против потока. Предположим, что граница Γ_1 неподвижна, то есть изменения фронта горения не происходит.

Особенностью данной системы уравнений является необходимость проводить расчет всех ее компонент в один и тот же момент времени.

Методы решения:

- Уравнение сохранения энергии.

Схема стабилизирующих поправок:

$$\frac{T^{n+1/2}(x, y, t) - T^n(x, y, t)}{\tau} = \lambda_1 T^{n+1/2}(x, y, t) + \lambda_2 T^n(x, y, t) + f,$$

$$\frac{T^{n+1}(x, y, t) - T^{n+1/2}(x, y, t)}{\tau} = \lambda_2 (T^{n+1}(x, y, t) - T^n(x, y, t)).$$

На первом шаге:

$$\begin{aligned} \rho_{ij}^n C_p \left(\frac{T_{ij}^{n+1/2} - T_{ij}^n}{\tau} + U_{ij}^n \frac{T_{i+1j}^{n+1/2} - T_{i-1j}^{n+1/2}}{2h_x} + V_{ij}^n \frac{T_{ij+1}^n - T_{ij-1}^n}{2h_y} \right) = \\ = \lambda \frac{T_{i+1j}^{n+1/2} - 2T_{ij}^{n+1/2} + T_{i-1j}^{n+1/2}}{h_x^2} + \lambda \frac{T_{ij+1}^n - 2T_{ij}^n + T_{ij-1}^n}{h_y^2} + \sum_{i=3}^6 q_i p_i. \end{aligned}$$

На втором шаге:

$$\rho_{ij}^n C_p \left(\frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^{n+1/2}}{\tau} + V_{ij}^n \frac{T_{ij+1}^{n+1} - T_{ij-1}^{n+1}}{2h_y} - V_{ij}^n \frac{T_{ij+1}^n - T_{ij-1}^n}{2h_y} \right) = \lambda \frac{T_{ij+1}^{n+1} - 2T_{ij}^{n+1} + T_{ij-1}^{n+1}}{h_y^2} - \lambda \frac{T_{ij+1}^n - 2T_{ij}^n + T_{ij-1}^n}{h_y^2},$$

где $q_{3-6}, k_{3-6}, c_{1-3}$ – особым образом заданные константы,

$$P_3 = k_3 \rho(x, y, t) c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT(x, y, t)}\right), \quad P_4 = k_4 \rho(x, y, t) c_2 \exp\left(-\frac{E_4}{RT(x, y, t)}\right),$$

$$P_5 = k_5 \rho(x, y, t) c_3 \exp\left(-\frac{E_5}{RT(x, y, t)}\right), \quad P_6 = k_6 \rho(x, y, t) c_3 \exp\left(-\frac{E_6}{RT(x, y, t)}\right)$$

- Уравнения состояния газовой фазы.

$$P_{ij}^{n+1} = \frac{\rho_{ij}^n * R * T_{ij}^{n+1}}{\mu}, \quad i = 0..N, \quad j = 0..M$$

- Уравнения движения Навье–Стокса.

Продольно-поперечная прогонка:

$$\frac{U^{n+1/2}(x, y, t) - U^n(x, y, t)}{\tau/2} = \lambda_1 U^{n+1/2}(x, y, t) + \lambda_2 U^n(x, y, t) + f,$$

$$\frac{U^{n+1}(x, y, t) - U^{n+1/2}(x, y, t)}{\tau/2} = \lambda_2 U^{n+1/2}(x, y, t) + \lambda_2 U^{n+1}(x, y, t).$$

На первом шаге:

$$\begin{aligned} \rho_{ij}^n \left(\frac{U_{ij}^{n+1/2} - U_{ij}^n}{\tau/2} + U_{ij}^n \frac{U_{i+1j}^{n+1/2} - U_{i-1j}^{n+1/2}}{2h_x} + V_{ij}^n \frac{U_{ij+1}^n - U_{ij-1}^n}{2h_y} \right) = \\ = \mu \frac{U_{i+1j}^{n+1/2} - 2U_{ij}^{n+1/2} + U_{i-1j}^{n+1/2}}{h_x^2} + \mu \frac{U_{ij+1}^n - 2U_{ij}^n + U_{ij-1}^n}{h_y^2} - \frac{P_{i+1j}^{n+1} - P_{i-1j}^{n+1}}{h_x}. \end{aligned}$$

На втором шаге:

$$\rho_{ij}^n \left(\frac{U_{ij}^{n+1} - U_{ij}^{n+1/2}}{\tau/2} + U_{ij}^n \frac{U_{i+1,j}^{n+1/2} - U_{i-1,j}^{n+1/2}}{2h_x} + V_{ij}^n \frac{U_{ij+1}^{n+1} - U_{ij-1}^{n+1}}{2h_y} \right) =$$

$$= \mu \frac{U_{i+1,j}^{n+1/2} - 2U_{ij}^{n+1/2} + U_{i-1,j}^{n+1/2}}{h_x^2} + \mu^* \frac{U_{ij+1}^{n+1} - 2U_{ij}^{n+1} + U_{ij-1}^{n+1}}{h_y^2} - \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i-1,j}^{n+1}}{h_x}.$$

- Уравнение неразрывности газовой смеси.

Схема с разностями против потока:

$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$

если $U_{i,j} > 0$ и $V_{i,j} > 0$, то

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (U_{i,j}^{n+1} - U_{i-1,j}^{n+1})}{h_x} + \frac{U_{i,j}^{n+1} (\rho_{i,j}^n - \rho_{i-1,j}^n)}{h_x} \right) - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j-1}^{n+1})}{h_y} + \frac{V_{i,j}^{n+1} (\rho_{i,j}^n - \rho_{i,j-1}^n)}{h_y} \right);$$

если $U_{i,j} > 0$ и $V_{i,j} < 0$, то

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (U_{i,j}^{n+1} - U_{i-1,j}^{n+1})}{h_x} + \frac{U_{i,j}^{n+1} (\rho_{i,j}^n - \rho_{i-1,j}^n)}{h_x} \right) - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (V_{i,j+1}^{n+1} - V_{i,j}^{n+1})}{h_y} + \frac{V_{i,j+1}^{n+1} (\rho_{i,j+1}^n - \rho_{i,j}^n)}{h_y} \right);$$

если $U_{i,j} < 0$ и $V_{i,j} > 0$, то

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (U_{i+1,j}^{n+1} - U_{i,j}^{n+1})}{h_x} + \frac{U_{i+1,j}^{n+1} (\rho_{i+1,j}^n - \rho_{i,j}^n)}{h_x} \right) - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (V_{i,j}^{n+1} - V_{i,j-1}^{n+1})}{h_y} + \frac{V_{i,j}^{n+1} (\rho_{i,j}^n - \rho_{i,j-1}^n)}{h_y} \right);$$

если $U_{i,j} < 0$ и $V_{i,j} < 0$, то

$$\rho_{i,j}^{n+1} = \rho_{i,j}^n - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (U_{i+1,j}^{n+1} - U_{i,j}^{n+1})}{h_x} + \frac{U_{i+1,j}^{n+1} (\rho_{i+1,j}^n - \rho_{i,j}^n)}{h_x} \right) - \tau \left(\frac{\rho_{i,j}^n (V_{i,j+1}^{n+1} - V_{i,j}^{n+1})}{h_y} + \frac{V_{i,j+1}^{n+1} (\rho_{i,j+1}^n - \rho_{i,j}^n)}{h_y} \right).$$

На рис. 2-4 приведены результаты, полученные в прямоугольной области размерами 3×1 с параметрами $h_x = 0.3$; $h_y = 0.1$; $\tau = 0.001$. Изображение получено при помощи программы Tecplot 360.

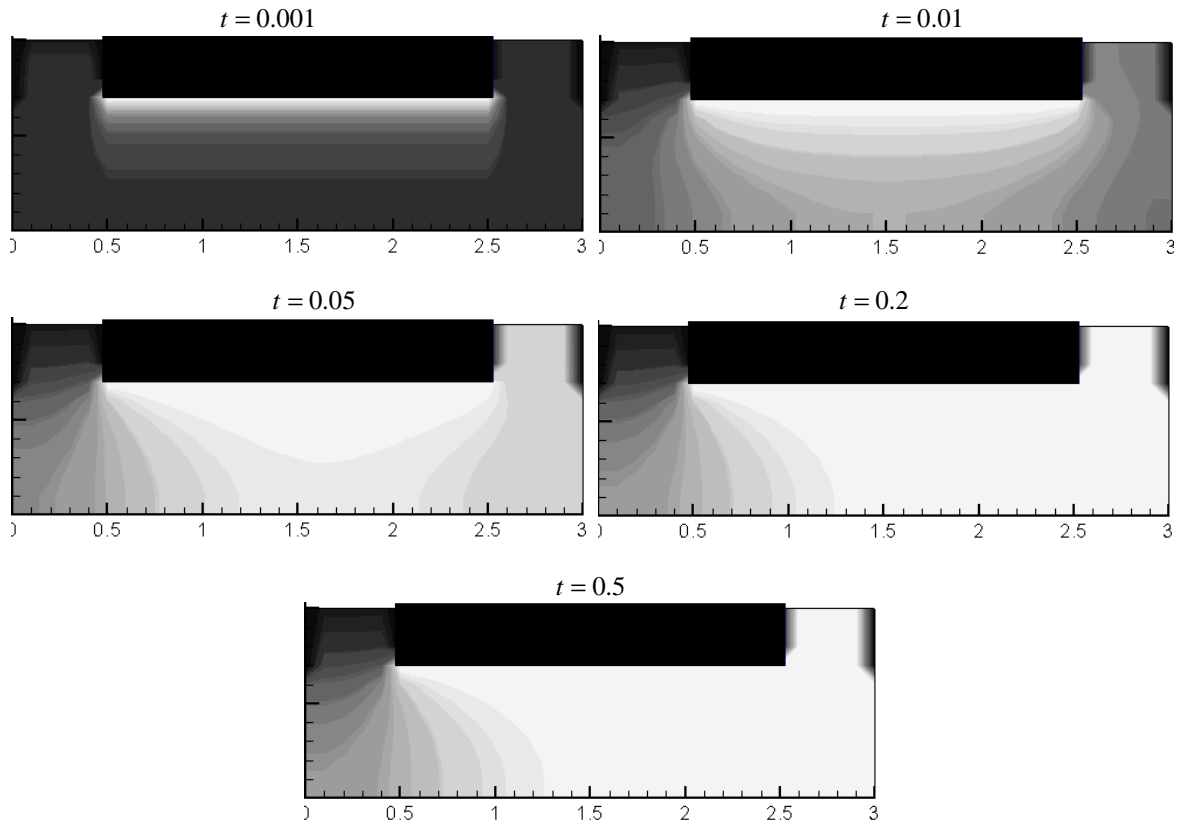


Рис. 2. Результаты моделирования $T(x, y, t)$ в различные моменты времени.

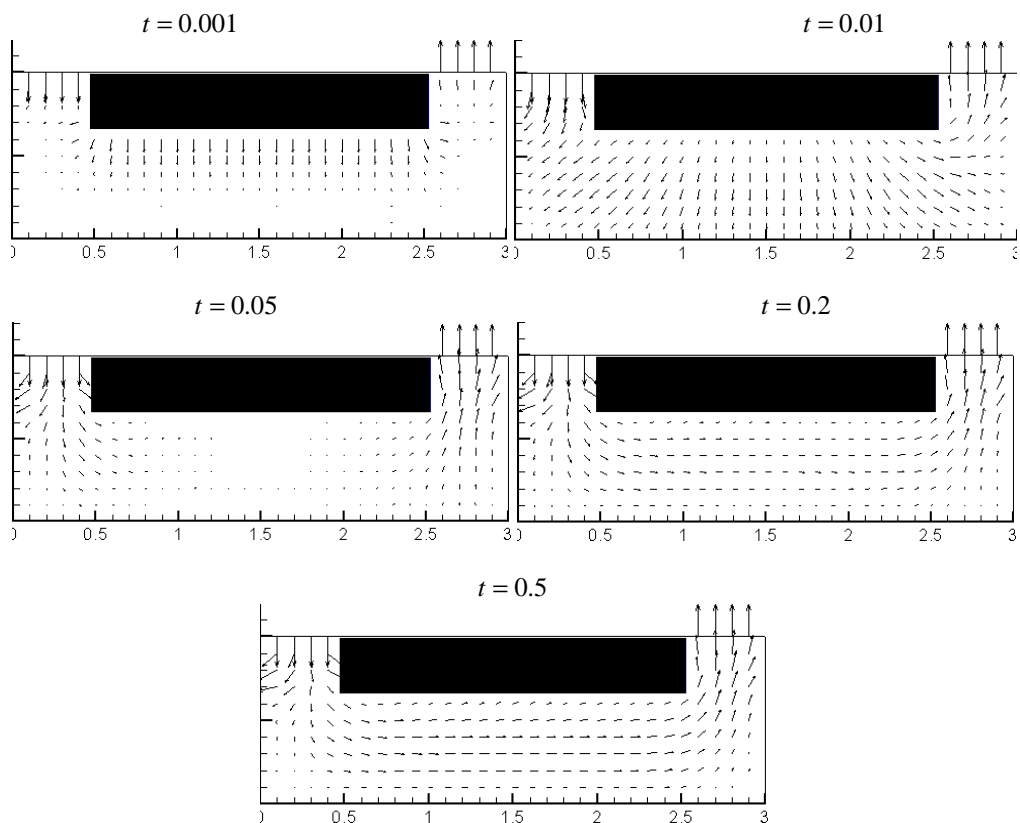


Рис. 3. Результаты моделирования (U, V) в различные моменты времени.

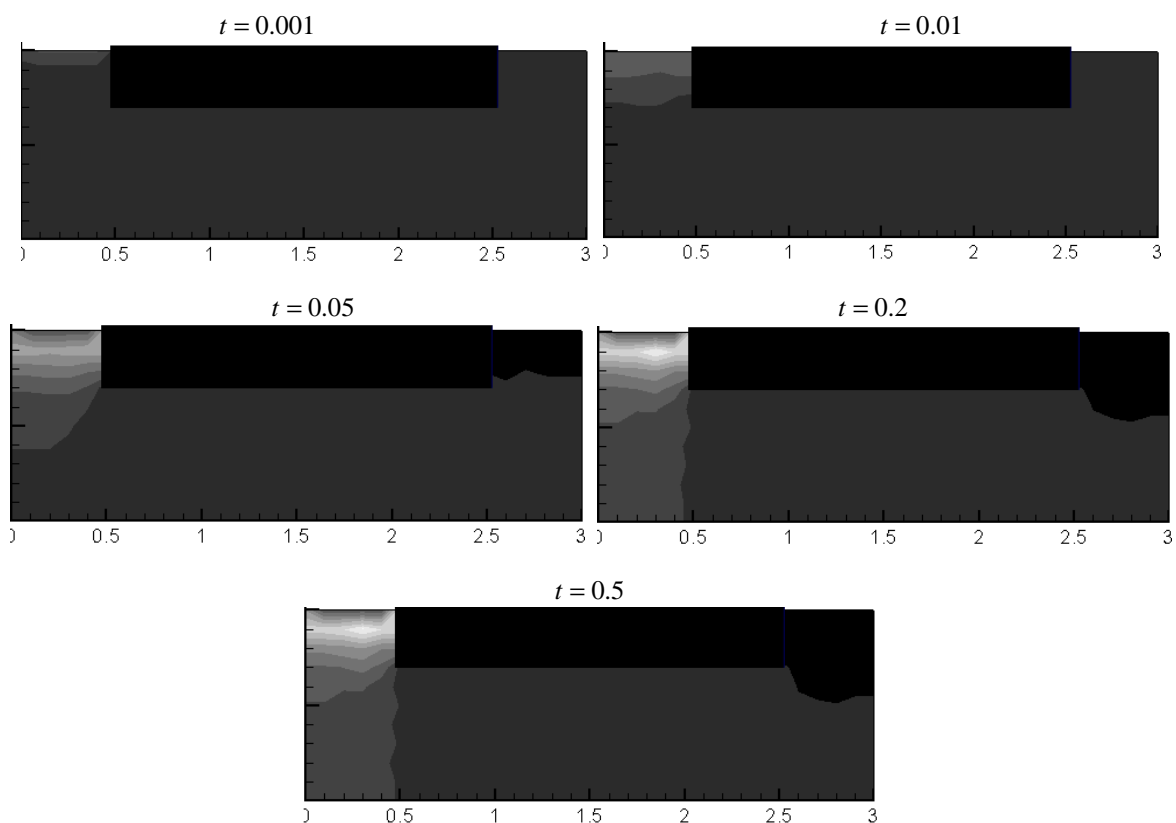


Рис. 4. Результаты моделирования $\rho(x, y, t)$ в различные моменты времени.

Литература

1. Газификация твердых топлив подземная. Химическая энциклопедия. www.ximuk.ru Дата обращения: 22.01.2010.
2. Крейнин Е.В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье. М.: 2004. 301 с.

Численный анализ обратной задачи распространения загрязнений в водоемах

О.В. Соболева

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

Введение

В настоящее время проблема охраны и восстановления окружающей среды становится одной из основных задач прикладной науки. Важной частью указанной задачи является борьба с антропогенным загрязнением морских и пресных водоемов [1-7]. Поступления загрязняющих веществ в водную среду избежать невозможно, но разумное использование природных ресурсов и постоянный контроль качества воды позволят обеспечить безопасный уровень воздействия на водную среду и избежать глобальных негативных последствий.

Применение метода математического моделирования для изучения процесса распространения загрязнений приводит к необходимости построения и исследования математических моделей, описывающих распространение загрязнений в изучаемой области. Указанные модели содержат ряд параметров, значения которых должны быть заданы для однозначного нахождения решения краевых задач. Но в практических задачах часто возникают ситуации, когда некоторые из параметров не известны либо заданы приближенно и их требуется найти вместе с решением. Такие задачи относятся к классу обратных задач идентификации неизвестных плотностей источников и коэффициентов, входящих в используемые модели распространения загрязнений.

Исследование коэффициентных обратных экстремальных задач для линейного стационарного уравнения конвекции-диффузии-реакции вызывает большие трудности, поскольку по своим постановкам они относятся к нелинейным и, как правило, к некорректным задачам математической физики. Это обстоятельство существенно осложняет проблему построения вычислительных алгоритмов для приближенного решения коэффициентных задач и затрудняет полное и строгое обоснование их сходимости.

Важно отметить, что исследование обратных задач можно свести к исследованию соответствующих экстремальных задач путем введения функционала качества, адекватно отвечающего рассматриваемой обратной задаче, и последующей его минимизации на решениях исходной задачи (см. [8-13]). Это позволяет рассматривать обратные задачи и задачи управления с единых позиций математической теории оптимального управления и применять для их решения один и тот же математический аппарат, основанный на теории экстремальных задач условной оптимизации [14,15].

Целью работы является численное исследование коэффициентных обратных экстремальных задач для стационарного уравнения конвекции-диффузии-реакции, описывающего распространение загрязняющего вещества в ограниченной области Ω при смешанных краевых условиях на границе области. В процессе работы планируется установить зависимости точности восстановления решения обратной задачи распространения загрязнения, от выбора значения параметра, входящего в регуляризирующую добавку минимизируемого функционала качества, начального приближения, размера и расположения области измерений и погрешности измерений.

Постановка прямой задачи

Рассмотрим в ограниченной области Ω из пространства R^d ($d = 2, 3$) с липшицевой границей Γ , состоящей из двух частей Γ_D и Γ_N , задачу нахождения концентрации C загрязняющего вещества из соотношений

$$-\lambda \Delta C + \mathbf{u} \nabla C - w_0 \frac{\partial C}{\partial z} + kC = f, \quad C|_{\Gamma_D} = \psi, \quad \lambda \left(\frac{\partial C}{\partial \mathbf{n}} + \alpha C \right) \Big|_{\Gamma_N} = \chi. \quad (1)$$

Здесь Δ – оператор Лапласа; λ – коэффициент диффузии; \mathbf{u} – скорость вещества в жидкости; w_0 – величина вертикальной скорости осаждения (или поднятия) частиц вещества; $k \geq 0$ – величина, характеризующая распад загрязняющего вещества за счет химических реакций; f – плотность распределенных источников; ψ – количество вещества на границе Γ_D ; χ – поток вещества через границу Γ_N ; α – коэффициент массообмена на границе Γ_N .

Постановка обратной задачи

Сформулируем обратную задачу для модели (1), заключающуюся в нахождении неизвестных параметров и искомого решения, по дополнительной информации о состоянии среды. В качестве указанной информации можно выбрать, например, значения $C_d(x)$ концентрации C , измеренные в некоторой области Q подобласти Ω . Решение обратных задач можно свести к решению экстремальных задач при соответствующем выборе функционала качества и управления. В качестве управления

выберем функцию χ и введем функционал качества $I: H^1(\Omega) \rightarrow R$ формулой $I(C) = \|C - C_d\|_{L^2(Q)} = \int_Q |C - C_d|^2 dx = \int_\Omega r(C - C_d)^2 dx$. Здесь r – характеристическая функция множества Q .

Рассматриваемая экстремальная задача состоит в нахождении пары функций (C, χ) удовлетворяющих слабой формулировке задачи (1) и минимизирующих функционал J ; т.е. должны выполняться следующие условия:

$$\lambda(\nabla C, \nabla h) + \lambda(\alpha C, h)_{\Gamma_N} - w_0 \left(\frac{\partial C}{\partial z}, h \right) + (kC, h) + (\mathbf{u} \nabla C, h) - (f, h) - (\chi, h)_{\Gamma_N} = 0, \quad C|_{\Gamma_D} = \psi \quad \forall h \in \Gamma, \quad (2)$$

$$J(C, \chi) = \frac{\mu_0}{2} \|C - C_d\|_Q + \frac{\mu}{2} \|\chi\|_{\Gamma_N} \rightarrow \inf, \quad (C, \chi) \in H^{-1}(\Omega) \times L^2(\Gamma_N).$$

Здесь (2) – слабая формулировка прямой задачи (1); $J: H^1(\Omega) \times K \rightarrow R$ – минимизируемый функционал (K – непустое выпуклое замкнутое множество); $\mu_0 \geq 0$, $\mu \geq 0$ – некоторые константы; $\chi \in K \subset L^2(\Gamma_N)$. Описание остальных используемых обозначений можно найти, например, в [14, гл.3].

Используя аппарат книги [14], можно вывести необходимые условия оптимальности для задачи (2) и записать соответствующую систему оптимальности в виде следующих соотношений:

$$(\nabla C, \nabla h) + (\alpha C, h)_{\Gamma_N} - w_0 \left(\frac{\partial C}{\partial z}, h \right) + (kC, h) + Pe(\mathbf{u} \nabla C, h) = (f, h) + (\chi, h)_{\Gamma_N}, \quad C|_{\Gamma_D} = \psi \quad \forall h \in \Gamma, \quad (3)$$

$$(\nabla \tau, \nabla \eta) + (\alpha \eta, \tau)_{\Gamma_N} - w_0 \left(\frac{\partial \tau}{\partial z}, \eta \right) + (k\tau, \eta) + Pe(\mathbf{u} \nabla \tau, \eta) = -(C - C_d, \tau)_Q, \quad \eta|_{\Gamma_D} = 0 \quad \forall \tau \in H^1(\Omega), \quad (4)$$

$$(\mu\chi - \eta, \tilde{\chi})_{\Gamma_N} = 0 \quad \forall \chi \in K. \quad (5)$$

Здесь и ниже $Pe = UL/\lambda$ – безразмерное число Пекле, где U и L – характерные значения скорости и длины рассматриваемой задачи. Этот безразмерный параметр подобия показывает отношение массопереноса за счет конвекции к массопереносу за счет диффузии. Подчеркнем также, что третья часть построенной системы оптимальности представляет вариационное тождество (5) относительно искомого управления χ .

Алгоритм численного решения обратной задачи переноса вещества

Опишем алгоритм решения сформулированной обратной задачи восстановления параметра χ . Указанный алгоритм основан на методе Ньютона и состоит из следующих этапов:

- 1) выбирается начальное приближение χ^0 и полагается $n = 0$;
- 2) находится приближенное решение в виде матрицы C^n прямой задачи (3) для выбранного значения параметра χ^n ;
- 3) находится приближенное решение в виде матрицы η^n сопряженной задачи (4) при выбранном χ^n , вычисленном выше C^n и заданном C_d ;
- 4) вычисляется вспомогательный вектор g^n по формуле

$$g^n = \mu\chi^n - \eta_N^n,$$

где χ_N^n – N -й столбец матрицы χ^n ;

- 5) вычисляется матрица Якоби $H = (H_{ij})$ конечно-разностным методом с помощью формул:

$$H_{ij} = \frac{\partial g_j^n}{\partial \chi_i^n} = \frac{g_j^n(x_i^n + s_i) - g_j^n(x_i^n)}{s_i}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, N,$$

где s_i – малое приращение χ_i^n ;

- 6) вычисляются новые значения χ^{n+1} компонент вектора χ по формуле $\chi^{n+1} = \chi^n - H^{-1}g^n$;

- 7) проверяется условие $\left(\sum_{i=1}^{N-1} (\chi_i^{n+1} - \chi_i^n)^2 \right)^{1/2} < 10^{-6}$.

Если это условие выполняется, то осуществляется выход из цикла, а за приближенное численное решение обратной задачи выбирается пара (χ^n, C^n) . В противном случае n увеличивается на 1 и осуществляется переход к п. 2.

Результаты численных экспериментов

В результате проведенных вычислительных экспериментов была исследована зависимость точности решения обратной задачи распространения загрязнения от размеров области дополнительных измерений и параметра регуляризации μ , входящего в минимизируемый функционал качества.

Численное решение поставленной задачи (3)–(5) в области Ω производилось посредством компьютерного моделирования, при котором дифференциальное уравнение конвекции-диффузии-реакции для стационарной модели распространения вещества в двумерной области дискретизировалось с помощью метода конечных разностей в программе Scilab [16] и метода конечных элементов – в пакете FreeFem++ [17]. Для возможности сравнения результатов вычислительных экспериментов, полученных с помощью различных методов и в различных пакетах, в исследуемой области Ω вводилась равномерная сетка. Поле концентрации рассчитывалось с соблюдением граничных условий и условий устойчивости разностной схемы.

При проведении вычислительных экспериментов был выбран водный объект, не содержащий источников загрязнения, но получающий некоторое количество загрязняющих веществ за счет принесения их вместе с потоком воды из соседней области либо в результате поступления веществ через некоторый участок границы в процессе массообмена. Для простоты исследования задача решалась для двумерного случая, а контуры участка реки сводились к единичному квадрату с расположением границ Γ_D и Γ_N , указанным на рис. 1. Такое допущение в модели возможно в случае, когда глубина водной акватории мала по сравнению с шириной и длиной участка, т.е. можно пренебречь распределением концентрации вещества по глубине [3]. Система координат выбиралась таким образом, чтобы ось Ox была направлена вдоль потока, а ось Oy – перпендикулярно потоку.

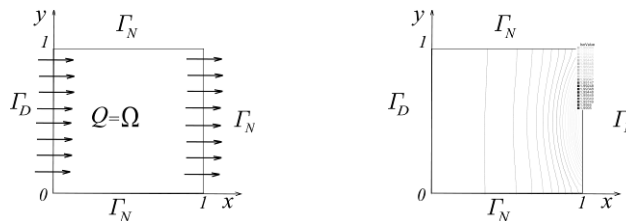


Рис. 1. Геометрия области переноса вещества и поле C_d концентрации загрязняющего вещества.

В качестве искомой функции выбиралась функция $\chi_d = 0.02 \sin(\pi y)$, а начального приближения – функция $\chi_0 = 0$. Исходные данные записывались в следующем виде:

$$\lambda = 0.2, \quad Pe = 0.25, \quad \mu_0 = 1, \quad f = 0, \quad w_0 = 0, \quad C|_{x=0} = 2, \quad \alpha = 0.05 \sin(\pi y).$$

На рис. 1 (слева) представлен случай, соответствующий условию, когда на участках границы Γ_N при $y = 0$, $y = 1$ ставилось условие $\partial C / \partial n = 0$, моделирующее отсутствие потока вещества через границу Γ_N . Вектор скорости потока, с помощью которого приносится вещество в область, задается в виде $\mathbf{u} = (1, 0)$. Для простоты исследований предполагается, что в область поступает неактивное вещество, т.е. оно не будет вступать в химические реакции внутри области, и соответственно коэффициент, отвечающий за химическую реакцию в уравнении конвекции-диффузии-реакции, выбирается равным нулю. Что касается дополнительной информации о состоянии среды, то в соответствии с концепцией квазиреального эксперимента в качестве указанной дополнительной информации использовались значения решения C_d исходной краевой задачи (1), вычисленные в подобласти Q области Ω в предположении, что все входные параметры известны.

На рис. 1 (справа) приводятся результаты расчета поля концентрации загрязняющего вещества для случая, когда известны все входные параметры, а область дополнительных измерений совпадает с областью исследования. Это позволит отследить работу алгоритма и построенных программ для решения обратной задачи распространения вещества без влияния ошибки, появляющейся в результате недостатка дополнительной информации о решении задачи. При исследовании зависимости решения обратной экстремальной задачи от значений параметра регуляризации μ данные результаты использовались в качестве дополнительной информации.

На рис. 2 приведены графики зависимости ошибок $E0 = \|C - C_d\|_Q / \|C_d\|_Q$ и $E1 = \|\chi - \chi_d\|_{\Gamma_N} / \|\chi_d\|_{\Gamma_N}$ от значений параметра μ . Они показывают, что при уменьшении значения параметра регуляризации μ точность решения обратной задачи улучшается. Эти результаты подтверждают графики восстанавливаемой функции χ на рис. 3, где «chi_toch» соответствует значениям $\chi = 0.02 \sin(\pi y)$, «chi_FDif» – решение обратной задачи, полученное в пакете Scilab, а «chi_FE» – решение обратной задачи полученное в пакете FreeFem++ для $\mu = 10^{-3}$ (слева) и $\mu = 10^{-5}$ (справа).

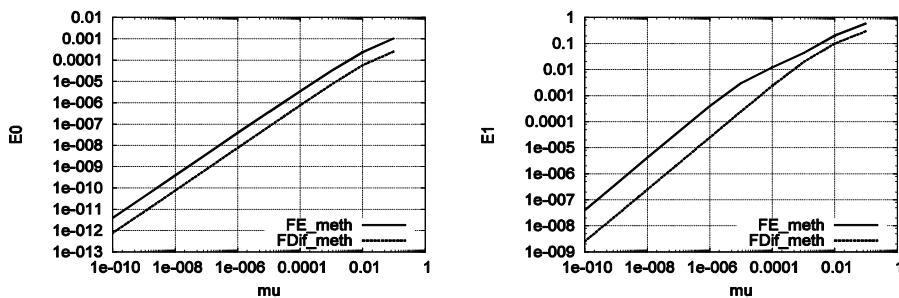


Рис. 2. Величина ошибок E_0 и E_1 в зависимости от параметра μ .

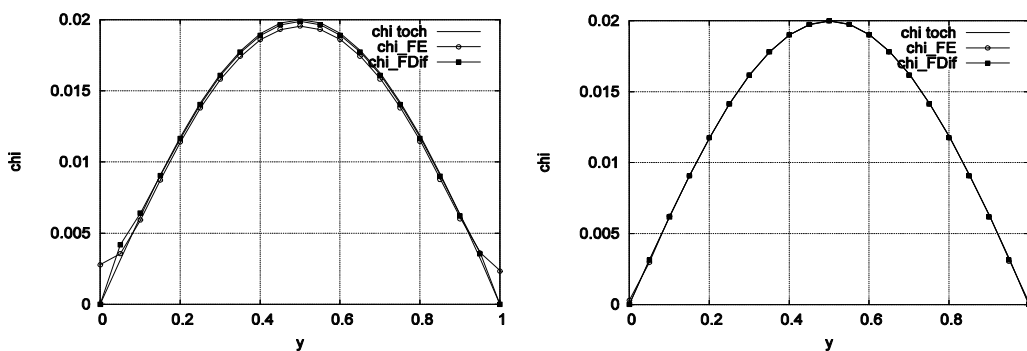


Рис. 3. Графики восстанавливаемой функции χ для $\mu = 10^{-3}$ и $\mu = 10^{-5}$.

Большой интерес представляет собой изучение зависимости точности решения обратной экстремальной задачи от размеров и расположения области дополнительных измерений. Для этого исследовался случай, когда область дополнительных измерений Q занимает некоторую часть рассматриваемой области и располагается так, как показано на рис. 4. Это отвечает ситуации, когда замеры концентрации загрязнения проводятся вдоль одного из берегов водного объекта.

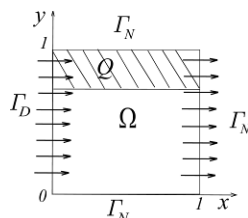


Рис. 4. Геометрия области переноса вещества и расположение области замеров Q .

Графики зависимостей ошибок E_0 и E_1 , на рис. 6 показывают, что качество решения обратной задачи зависит от площади области замеров, причем увеличение площади области замеров повышает качество решения обратной задачи.

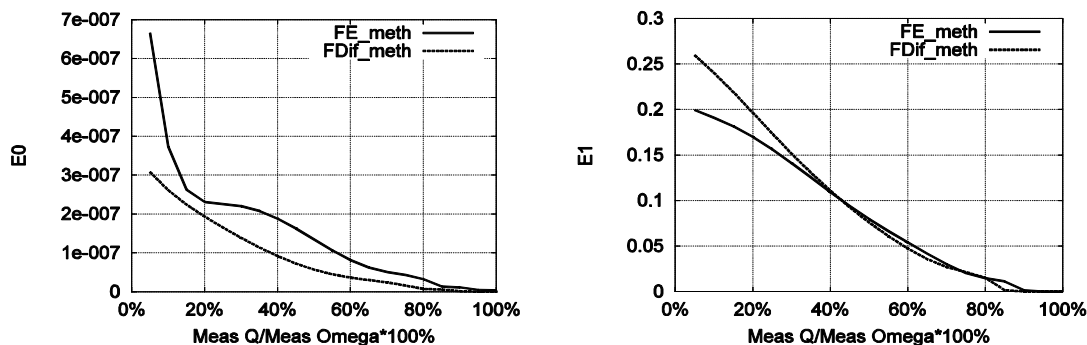


Рис. 5. Зависимость ошибки E_0 (слева) и E_1 (справа) от площади области Q .

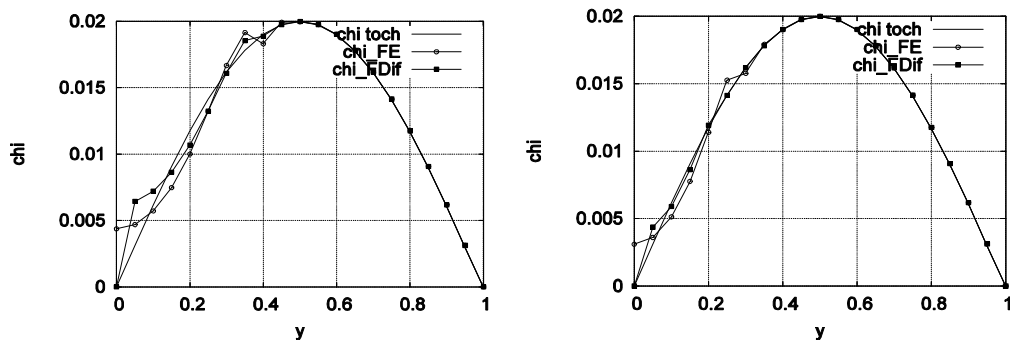


Рис. 6. Графики функции χ при разных размерах области дополнительных измерений Q .

На рис. 6 представлены графики функции χ в зависимости от площади области дополнительных измерений при $\mu = 10^{-7}$. Слева представлен график для случая, когда площадь области Q составляет 40% от площади рассматриваемой области, а справа – когда площадь области Q составляет 50%.

Заключение

В работе было проведено численное исследование обратных задач распространения загрязнений в ограниченной области. Установлены зависимости точности восстановления решения обратной задачи распространения загрязнения, от выбора значения параметра, входящего в регуляризующую добавку минимизируемого функционала качества, начального приближения, размера и расположения области измерений и погрешности измерений. Проведено сравнение результатов численных экспериментов, полученных в разных пакетах и с помощью различных методов. Построены и протестированы программы для решения обратной задачи, описывающей процесс переноса загрязняющих веществ в двумерной ограниченной области.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки по ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 гг. в рамках госконтракта №14.740.12.0835, грантов РФФИ № 11-01-98508-р_восток_a, 10-01-00219-а.

Литература

1. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982.
2. Белопицкий В.М., Шокин Ю.И. Математическое моделирование в задачах защиты окружающей среды. Новосибирск: ИНФОЛИО-пресс, 1997.
3. Бабаян А.В., Надолин К.А. О моделировании распространения вещества в плоском стационарном потоке вязкой жидкости // Водные ресурсы. 2000. Т. 27, № 2. С. 184-191.
4. Бабешко О.М., Евдокимова О.В., Евдокимов С.М. Об учете типов источников и зон оседания загрязняющих веществ // Докл. АН. 2000. Т. 371, № 1. С. 32-34.
5. Бардина М.Н. Одномерная модель распространения несмешивающихся с водой органических загрязнений в зоне аэрации // Вестн. СамГУ. Естественнонаучная сер. 2007. Т. 52, № 2. С. 46-56.
6. Бочев М.А., Надолин К.А., Николаев И.А. Моделирование распространения вещества в двумерном стационарном открытом русловом потоке // Мат. мод. и выч. эксперимент. 1996. Т. 8, № 1. С. 11-24.
7. Надолин К.А. Моделирование перемешивания и переноса вещества в русловых потоках // Экологич. вестн. науч. центров ЧЭС. Приложение. 2004. С. 50-71.
8. Alekseev S.V., Adomavichus E.A. Theoretical analysis of inverse extremal problems of admixture diffusion in viscous fluids // J. Inv. Ill-Posed Problems. 2001. Vol. 9, N 5. P. 435-468.
9. Алексеев Г.В. Обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений теории массопереноса // Ж. вычисл. матем. и мат. физики. 2002. Т. 42, № 3. С. 380-394.
10. Алексеев Г.В. Коэффициентные обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений тепломассопереноса // Журн. вычисл. матем. и мат. физики. 2007. Т. 47, № 6. С. 1055-1076.
11. Алексеев Г.В., Соболева О.В., Терешко Д.А. Задачи идентификации для стационарной модели массопереноса // Прикл. мех. техн. физика. 2008. Т. 49, № 4. С. 24-35.
12. Алексеев Г.В., Соболева О.В. Об устойчивости решений экстремальных задач для стационарных уравнений массопереноса // Дальневост. мат. журн. 2009. Т. 9, № 1/2. С. 5-14.
13. Соболева О.В. Обратные экстремальные задачи для стационарного уравнения конвекции-диффузии-реакции // Дальневост. матем. журн. 2010. Т. 10, № 2. С. 171-184.
14. Алексеев Г.В., Терешко Д.А. Анализ и оптимизация в гидродинамике вязкой жидкости. Владивосток: Дальнаука, 2008. 365 с.
15. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. М.: Наука. 1974. 480 с.
16. <http://www.scilab.org>
17. <http://www.freefem.org/ff++/index.htm>

Численное решение задачи обнаружения источника загрязнения для нелинейной модели массопереноса

Д.А. Терешко

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток

1. Введение

В последнее время уделяется большое внимание обратным задачам для моделей тепломассопереноса в вязкой несжимаемой жидкости. В этих задачах неизвестные плотности граничных либо распределенных источников, коэффициенты дифференциальных уравнений модели или граничных условий восстанавливаются по дополнительной информации о решении исходной краевой задачи. Важно отметить, что обратные задачи могут быть сведены к соответствующим экстремальным задачам при помощи выбора подходящего минимизируемого функционала качества, адекватно описывающего рассматриваемую обратную задачу. В результате этого обратные задачи и задачи управления могут быть исследованы с помощью единого подхода, основанного на теории оптимального управления в гильбертовых или банаховых пространствах (см. [1]).

Пусть Ω – ограниченная область в пространстве \mathbf{R}^m , $m=2,3$ с липшицевой границей Γ . Рассмотрим краевую задачу для стационарных уравнений Обербека – Буссинеска:

$$-\nu \Delta \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} + (\beta_C C - \beta_T T) \mathbf{G}, \quad \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 \text{ в } \Omega, \quad \mathbf{u} = \mathbf{g} \text{ на } \Gamma, \quad (1)$$

$$-\lambda_T \Delta T + \mathbf{u} \cdot \nabla T = f_T \text{ в } \Omega, \quad T = 0 \text{ на } \Gamma_D, \quad \lambda_T (\partial T / \partial n + \alpha_T T) = \chi_T \text{ на } \Gamma_N, \quad (2)$$

$$-\lambda \Delta C + \mathbf{u} \cdot \nabla C - w_0 \partial C / \partial z + kC = f \text{ в } \Omega, \quad C = 0 \text{ на } \Gamma_D, \quad \lambda (\partial C / \partial n + \alpha C) = \chi \text{ на } \Gamma_N, \quad (3)$$

описывающую стационарное течение вязкой несжимаемой теплопроводной жидкости в области Ω . Здесь \mathbf{u} , p , T и C – скорость, давление, температура и концентрация загрязняющего вещества; ν – коэффициент кинематической вязкости; \mathbf{G} – вектор ускорения свободного падения; β_T и β_C – объемные коэффициенты теплового и массового расширения; λ_T – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент диффузии; \mathbf{g} – заданная вектор-функция на границе Γ ; α_T , α , χ_T , χ – некоторые функции на части $\Gamma_N = \Gamma \setminus \Gamma_D$ границы Γ ; \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали. Постоянная плотность выбрана равной 1.

В частном случае, когда $\beta_C = 0$, задача (1)-(3) разбивается на две задачи: задачу (1), (2) для уравнений тепловой конвекции в приближении Обербека – Буссинеска и линейную краевую задачу (3) (при заданной скорости \mathbf{u}), описывающую распространение пассивной примеси. Экстремальные задачи для модели (1), (2) изучались разными авторами (см., например, [2-6]). В другом частном случае, когда $\beta_T = 0$, задача (1)-(3) распадается на задачу (1), (3) для модели переноса вещества и линейную задачу конвекции-диффузии (2) для температуры T . Экстремальные задачи для (1), (3) рассматривались в [7-10]. Упомянем также работы [11, 12], в которых были рассмотрены обратные экстремальные задачи восстановления неизвестных плотностей тепла и вещества для общей модели (1)-(3).

Будем предполагать, что выполняются следующие условия:

- (i) Ω – ограниченная область в \mathbf{R}^3 с липшицевой границей $\Gamma \in C^{0,1}$, состоящей из n связных компонент $\Gamma^{(i)}$, $i=1,2,\dots,n$; открытые участки Γ_D и Γ_N границы Γ удовлетворяют условиям $\Gamma_D \in C^{0,1}$, $\operatorname{meas} \Gamma_D > 0$, $\Gamma_N \in C^{0,1}$, $\Gamma = \overline{\Gamma_D} \cup \overline{\Gamma_N}$;
- (ii) $\mathbf{f} \in \mathbf{H}^{-1}(\Omega)$, $\mathbf{g} \in \mathbf{H}^{1/2}(\Gamma)$, $f \in L^2(\Omega)$.

Ниже мы будем использовать пространства Соболева $H^s(D)$, где $s \in \mathbf{R}$, а в качестве D может выступать область Ω или ее подмножество Q либо граница Γ или некоторая ее часть с положительной мерой. В частности, нам потребуются функциональные пространства $H^1(\Omega)$, $\mathbf{H}^1(\Omega)$, $L^2(\Omega)$, $\mathbf{H}^{1/2}(\Gamma)$, $H^{1/2}(\Gamma_D)$ и их подпространства

$$\Theta = \{\theta \in H^1(\Omega) : \theta|_{\Gamma_D} = 0\}, \quad L_0^2(\Omega) = \left\{ r \in L^2(\Omega) : \int_{\Omega} r \, d\Omega = 0 \right\}, \quad L_+^2(\Gamma_N) = \{\varphi \in L^2(\Gamma_N) : \varphi \geq 0 \text{ п.в. на } \Gamma_N\},$$

$$\mathbf{H}_0^1(\Omega) = \{\mathbf{v} \in \mathbf{H}^1(\Omega) : \mathbf{v}|_{\Gamma} = 0\}, \quad \tilde{\mathbf{H}}^1(\Omega) = \left\{ \mathbf{v} \in \mathbf{H}^1(\Omega) : \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}|_{\Gamma_N} = 0, \int_{\Gamma^{(i)}} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, d\sigma = 0, i=1,2,\dots,N \right\}.$$

Скалярные произведения и нормы в $L^2(\Omega)$ или $L^2(\Gamma_N)$ обозначаются через (\cdot, \cdot) , $\|\cdot\|$ или $(\cdot, \cdot)_{\Gamma_N}$, $\|\cdot\|_{\Gamma_N}$. Норму в $H^1(\Omega)$ обозначаем $\|\cdot\|_1$.

Справедлива следующая вспомогательная лемма (см. [1]):

Лемма 1. При выполнении условия (i) существуют такие константы $\delta_i > 0$, $\gamma_i > 0$ и β_1 , что

$$\begin{aligned} (\nabla \mathbf{v}, \nabla \mathbf{v}) &\geq \delta_0 \|\mathbf{v}\|_1^2 \quad \forall \mathbf{v} \in \mathbf{H}_0^1(\Omega), \quad (\nabla \phi, \nabla \phi) \geq \delta_1 \|\phi\|_1^2 \quad \forall \phi \in \Theta, \\ |(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{v}, \mathbf{w})| &\leq \gamma_0 \|\mathbf{u}\|_1 \|\mathbf{v}\|_1 \|\mathbf{w}\|_1 \quad \forall \mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w} \in \mathbf{H}^1(\Omega), \\ |(\mathbf{u} \cdot \nabla \phi, \eta)| &\leq \gamma_1 \|\mathbf{u}\|_1 \|\phi\|_1 \|\eta\|_1, \quad |(\beta \phi \mathbf{G}, \mathbf{v})| \leq \beta_1 \|\phi\|_1 \|\mathbf{v}\|_1 \quad \forall \phi, \eta \in H^1(\Omega), \mathbf{u}, \mathbf{v} \in \mathbf{H}^1(\Omega), \\ |(\chi, \eta)_{\Gamma_N}| &\leq \gamma_2 \|\chi\|_{\Gamma_N} \|\eta\|_1, \quad |(\alpha \phi, \eta)_{\Gamma_N}| \leq \gamma_3 \|\alpha\|_{\Gamma_N} \|\phi\|_1 \|\eta\|_1 \quad \forall \phi \in H^1(\Omega), \eta \in H^1(\Omega). \end{aligned}$$

2. Теоретический анализ экстремальных задач

Рассмотрим краевую задачу (1), (3) при $\beta_T = 0$, на которую для краткости будем ссылаться как на задачу 1. Будем предполагать, что функции α и χ в граничном условии для C неизвестны вместе с решением (\mathbf{u}, p, C) . Такая ситуация может наблюдаться в случае, когда область Ω имеет границу Γ , состоящую из внешней компоненты Γ_D , на которой задано условие Дирихле, и внутренней компоненты Γ_N . Естественно предположить, что значения концентрации C на внешней границе Γ_D и в малой подобласти Q , лежащей в окрестности Γ_D , могут быть измерены. В то же время внутренняя граница Γ_N может оказаться недоступной для измерений. Поэтому параметры α и χ , которые относятся к внутренней границе, неизвестны. В этой ситуации возникает задача идентификации, в которой необходимо найти решение (\mathbf{u}, p, C) задачи (1), (3) при $\beta_T = 0$ вместе с парой (α, χ) , используя измеренные значения поля концентрации C_d в некоторой области Q . Аналогичные примеры возникают в задачах теплопереноса для модели (1), (2).

Для решения задачи идентификации применим метод оптимизации. Это означает, что мы будем искать неизвестные функции $(\mathbf{u}, p, C, \alpha, \chi)$ с помощью минимизации некоторого функционала качества \tilde{J} . В качестве \tilde{J} обычно рассматривают функционалы зависящие от скорости и концентрации, например,

$$J_1(\mathbf{u}) = \|\text{rot } \mathbf{u} - \zeta_d\|_Q^2, \quad J_2(C) = \|C - C_d\|_Q^2,$$

где функции $\zeta \in L^2(Q)$ и $C_d \in L^2(Q)$ моделируют измеренное поле завихренности и концентрации в области Q . Предполагая для простоты, что $w_0 = 0$, $k = 0$, разобьем все данные задачи 1 на две группы: группу управлений, содержащую функции α и χ , и группу фиксированных данных, содержащую функции $(\mathbf{f}, \mathbf{g}, f)$. Полагая $u = (\alpha, \chi)$, $u_0 = (\mathbf{f}, \mathbf{g}, f)$, $\mathbf{x} = (\mathbf{u}, p, C)$,

$$X = \mathbf{H}^1(\Omega) \times L_0^2(\Omega) \times \Theta, \quad Y = \mathbf{H}^{-1}(\Omega) \times L_0^2(\Omega) \times \tilde{\mathbf{H}}^{1/2}(\Gamma) \times H^{-1}(\Omega),$$

введем оператор $F = (F_1, F_2, F_3, F_4): X \times K \rightarrow Y$, действующий по формулам

$$\begin{aligned} \langle F_1(\mathbf{x}, u), \mathbf{v} \rangle &= \nu(\nabla \mathbf{u}, \nabla \mathbf{v}) + ((\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u}, \mathbf{v}) + (\text{div } \mathbf{v}, p) + (\beta_C \mathbf{G} C, \mathbf{v}) - \langle \mathbf{f}, \mathbf{v} \rangle, \\ \langle F_2(\mathbf{x}, u), s \rangle &= -(\text{div } \mathbf{u}, s), \\ F_3(\mathbf{x}, u) &= \mathbf{u}|_{\Gamma} - \mathbf{g}, \\ \langle F_4(\mathbf{x}, u), h \rangle &= \lambda(\nabla C, \nabla h) + \lambda(\alpha C, h)_{\Gamma_N} + (\mathbf{u} \cdot \nabla C, h) - (f, h) - (\chi, h)_{\Gamma_N}. \end{aligned}$$

Умножим первое уравнение в (1) на функцию $\mathbf{v} \in \mathbf{H}_0^1(\Omega)$, уравнение в (3) на функцию $h \in \Theta$ и проинтегрируем полученные соотношения по Ω . Применяя формулы Грина, мы получаем слабую формулировку задачи 1. Она заключается в нахождении тройки $(\mathbf{u}, p, C) \in X$ из операторного уравнения

$$F(\mathbf{x}, u) = F(\mathbf{u}, p, C, \alpha, \chi) = 0.$$

Ниже будем предполагать, что управления α и χ изменяются на множествах $K_1 \subset L_+^2(\Gamma_N)$ и $K_2 \subset L^2(\Gamma_N)$. Через μ_0 , μ_1 и μ_2 обозначим неотрицательные константы. Более точно, предположим, что выполняются следующие условия:

- (j) $K_1 \subset L_+^2(\Gamma_N)$ и $K_2 \subset L^2(\Gamma_N)$ – непустые замкнутые выпуклые множества; $\mu_0 > 0$, $\mu_l \geq 0$, $l = 1, 2$.
- (jj) $\mu_l \geq 0$ и K_l – ограниченное множество либо $\mu_l \geq 0$, $l = 1, 2$.

Сформулируем следующую задачу условной минимизации:

$$\begin{aligned} J(\mathbf{x}, u) &= \frac{\mu_0}{2} \tilde{J}(\mathbf{x}) + \frac{\mu_1}{2} \|\alpha\|_{\Gamma_N}^2 + \frac{\mu_2}{2} \|\chi\|_{\Gamma_N}^2 \rightarrow \inf, \\ F(\mathbf{x}, u) &= 0, \quad (\mathbf{x}, u) \in X \times K, \end{aligned} \tag{4}$$

где $K = K_1 \times K_2$.

Следующие теоремы устанавливают достаточные условия существования и локальной единственности решения задачи 1, а также разрешимость, справедливость принципа множителей Лагранжа и локальную единственность для экстремальной задачи (4). Их доказательства можно найти в [1,6].

Теорема 1. При выполнении условий (i), (ii) задача 1 для любой пары $(\alpha, \chi) \in K$ имеет слабое решение (\mathbf{u}, p, C) , удовлетворяющее оценкам

$$\|\mathbf{u}\|_1 \leq M_u, \quad \|p\| \leq M_p, \quad \|C\|_1 \leq M_C,$$

где $M_u(u_0, u)$, $M_p(u_0, u)$ и $M_C(u_0, u)$ – непрерывные неубывающие функции норм функций \mathbf{f} , \mathbf{g} , f , α и χ . Если, кроме того, \mathbf{f} , \mathbf{g} , f и χ являются малыми в том смысле, что $\Re e + \Re a < 1$, где

$$\Re e = \sup_{u \in K} \frac{\gamma_0}{\delta_0 V} M_u(u_0, u), \quad \Re a = \sup_{u \in K} \frac{1}{\delta_0 V} \frac{\beta_1 \gamma_1}{\delta_1 \lambda} M_C(u_0, u),$$

то слабое решение задачи 1 единственно для любого элемента $u \in K$.

Теорема 2. Пусть выполняются условия (i), (ii), (j), (jj). Тогда существует, по крайней мере, одно решение задачи (4).

Важную роль при теоретическом и численном исследовании задач управления играет система оптимальности, представляющая собой необходимые условия экстремума первого порядка. Систему оптимальности обычно получают при помощи принципа неопределенных множителей Лагранжа, теоретическое обоснование которого дает следующая теорема.

Теорема 3. Пусть при выполнении условий (i), (ii), (j), (jj) элемент $(\hat{\mathbf{x}}, \hat{u}) = (\hat{\mathbf{u}}, \hat{p}, \hat{C}, \hat{\alpha}, \hat{\chi}) \in X \times K$ является точкой локального минимума в задаче (4). Тогда существует ненулевой множитель Лагранжа $(\lambda_0, y^*) = (\lambda_0, \xi, \sigma, \zeta, \theta, \tau) \in \mathbf{R}^+ \times Y^*$ такой, что выполняется уравнение Эйлера-Лагранжа

$$F'_x(\hat{\mathbf{x}}, \hat{u})^* y^* = -\lambda_0 J'_x(\hat{\mathbf{x}}, \hat{u}) \text{ в } X^*$$

для сопряженного состояния y^* и справедлив принцип минимума, который эквивалентен неравенству

$$-((\alpha - \hat{\alpha})\phi, \theta)_{\Gamma_N} + (\chi - \hat{\chi}, \theta)_{\Gamma_N} \leq \lambda_0 [J(\hat{\mathbf{x}}, u) - J(\hat{\mathbf{x}}, \hat{u})] \quad \forall u \in K. \quad (5)$$

Другой важной теоретической проблемой является вопрос об установлении достаточных условий единственности решения экстремальной задачи.

Теорема 4. Пусть в условиях теоремы 3 $\Re e + \Re a < 1/2$ для любого $u \in K$, $\mu_0 > 0$ и выполняются следующие неравенства:

$$\mu_1 > \mu_0 \frac{2\gamma_3^2 \lambda^2 M M^0}{\beta_1 \gamma_1}, \quad \mu_2 > \mu_0 \frac{2\gamma_2^2 M M^0}{\beta_1 \gamma_1},$$

где

$$M \equiv \frac{\Re a}{1-2 \Re a} (16 \frac{\gamma_0}{\gamma_1} \Re a^2 + 8 \text{Pr} \Re a^2 + 10 \text{Pr} \Re a + 3 \text{Pr}), \quad \text{Pr} = \frac{\delta_0 V}{\delta_1 \lambda}, \quad M^0 = \sup_{u \in K} M_C(u_0, u).$$

Тогда решение $(\mathbf{u}, p, C, \alpha, \chi)$ задачи (4) единственно.

По аналогичной схеме формулируются обратные экстремальные задачи для модели (1), (2) при $\beta_C = 0$. Более подробно об этом можно прочитать в работах [2-6], где также можно найти подробные доказательства аналогов теорем 1–4 для модели (1), (2) при $\beta_C = 0$.

3. Численный анализ

Рассмотрим в этом разделе численное решение экстремальной задачи (4) для уравнений (1), (3) при $\beta_T = 0$. В качестве единственного управления будем использовать функцию χ на части Γ_N границы Γ . Этот случай соответствует задаче обнаружения граничных источников загрязнения. При этом будем считать, что множество управлений K совпадает со всем пространством $L^2(\Gamma_N)$. Тогда минимум функционала будет достигаться во внутренней точке множества K и принцип минимума (5) можно заменить следующим тождеством:

$$(\mu \chi - \theta)_{\Gamma_N} = 0 \quad \forall \phi \in L^2(\Gamma_N).$$

Выразив отсюда χ по формуле $\chi = \theta / \mu$, мы можем исключить управление из системы оптимальности. Полученные соотношения, содержащие в качестве неизвестных величин основное состояние (\mathbf{u}, p, C) и сопряженное состояние (ξ, σ, θ) , для краткости будем записывать в виде операторного уравнения

$$\Psi(\mathbf{u}, p, C, \xi, \sigma, \theta) = 0.$$

Здесь Ψ – некоторый нелинейный оператор, определяемый введенным выше оператором F .

Для численного его решения предлагается итерационный алгоритм, основанный на методе Ньютона. Он состоит из следующих этапов:

0. Выбираем начальное приближение $\mathbf{u}_0, p_0, C_0, \xi_0, \sigma_0, \theta_0$. Полагаем $n = 0$.

1. Вычисляем $(\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{p}, \tilde{C}, \tilde{\xi}, \tilde{\sigma}, \tilde{\theta})$ как решение линейного операторного уравнения

$$\Psi'(\mathbf{u}_n, p_n, C_n, \xi_n, \sigma_n, \theta_n)(\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{p}, \tilde{C}, \tilde{\xi}, \tilde{\sigma}, \tilde{\theta}) = -\Psi(\mathbf{u}_n, p_n, C_n, \xi_n, \sigma_n, \theta_n). \quad (6)$$

2. Пересчитываем значения искомых величин по формулам

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{n+1} &= \mathbf{u}_n + \tilde{\mathbf{u}}, \quad p_{n+1} = p_n + \tilde{p}, \quad C_{n+1} = C_n + \tilde{C}, \\ \xi_{n+1} &= \xi_n + \tilde{\xi}, \quad \sigma_{n+1} = \sigma_n + \tilde{\sigma}, \quad \theta_{n+1} = \theta_n + \tilde{\theta}. \end{aligned}$$

3. Проверяем условие выхода из цикла. Если оно не выполняется, то увеличиваем номер шага n на 1 и переходим к этапу 1.

Использование метода Ньютона связано с нелинейностью оператора Ψ . В проведенных вычислительных экспериментах роль условия выхода из цикла играло неравенство $\|C_{n+1} - C_n\| / \|C_n\| < 10^{-6}$. Операторное уравнение (6) в подробной записи представляет собой краевую задачу для системы линейных уравнений в частных производных для искомых величин $(\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{p}, \tilde{C}, \tilde{\xi}, \tilde{\sigma}, \tilde{\theta})$.

Для ее решения используется метод конечных элементов.

Рассмотрим кратко результаты вычислительных экспериментов по решению задачи условной минимизации для уравнений (1), (3) при $\beta_T = 0$ для течения в канале с переменным сечением. Она заключается в нахождении неизвестной плотности χ граничного источника загрязнения (играющей роль единственного управления) из условия минимизации функционала $J_2(C) = \|C - C_d\|_Q^2$. Здесь C_d – измеренное в некоторой подобласти Q поле концентрации примеси. Как и выше будем считать, что множество управлений K совпадает со всем пространством $L^2(\Gamma_N)$. В таком случае для решения экстремальной задачи можно использовать представленный выше алгоритм.

В вычислительных экспериментах в качестве функции C_d использовалось решение краевой задачи (1), (3) для некоторой функции χ_d , заданной на части Γ_N границы Γ . Изолинии полученного таким образом поля концентраций при числе Рейнольдса $Re = 100$, диффузионном числе Рэлея $Ra_c = 10^5$ показаны на рис. 1. Хорошо видно, что источник загрязнения расположен в центре верхней границы канала.

В этой задаче важным является вопрос о влиянии размера и положения множества наблюдений Q на точность решения экстремальной задачи. На рис. 2 представлена разность восстановленного поля концентрации C и исходного поля C_d для случая, когда множество Q занимает правую половину области Ω .

Легко заметить, что основные отклонения восстановленной концентрации C от исходных значений C_d расположены в левой половине области Ω , так как при решении обратной задачи на этой части значения функции C_d не были указаны. В правой половине канала разность концентраций близка к нулю.

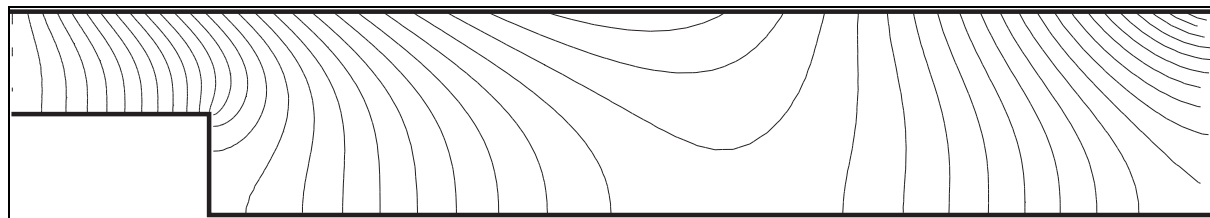


Рис. 1. Изолинии заданного поля концентрации C_d .



Рис. 2. Изолинии разности концентраций $C - C_d$.

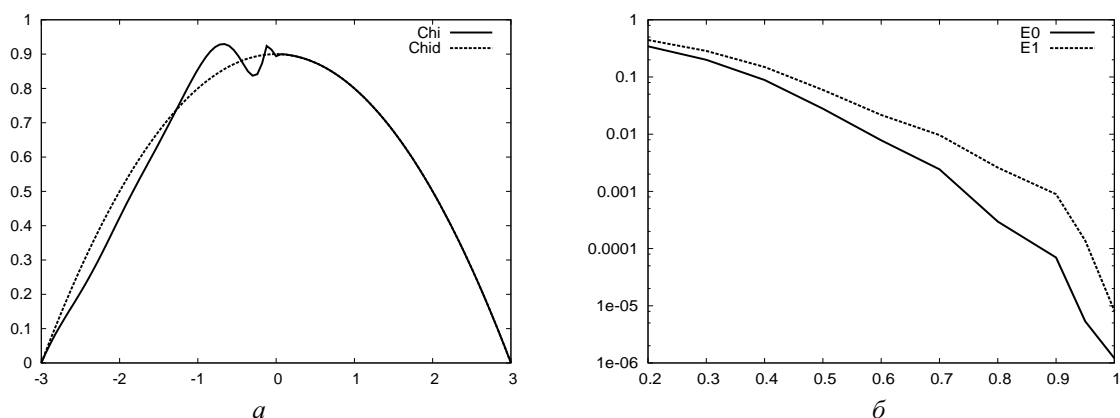


Рис. 3. Зависимость точности восстановления функции источника χ от размера множества Q .

На рис. 3,а представлены графики исходной функции χ_d и полученного решения χ , определяющего искомый источник загрязнения на верхней границе области течения. Хорошо видно, что на правой половине графики практически совпадают. Если множество наблюдений Q совпадает со всей областью Ω , то такое совпадение наблюдается на всей области определения функции χ . Для оценки точности решения экстремальной задачи используются следующие две относительные погрешности:

$$E_0 = \frac{\|C - C_d\|}{\|C_d\|}, \quad E_1 = \frac{\|\chi - \chi_d\|_{\Gamma_N}}{\|\chi_d\|_{\Gamma_N}}.$$

Зависимости этих величин от относительного размера множества Q представлены на рис. 3,б.

Хорошо видно, что с увеличением размера подобласти Q относительные ошибки уменьшаются. Если множество наблюдений Q занимает половину области Ω , то относительная ошибка для концентрации составляет примерно 3%. В случае, когда множество Q совпадает со всей областью Ω , величина E_0 принимает значение порядка 10^{-6} . Результаты других вычислительных экспериментов по обнаружению источников загрязнения с более подробным описанием можно найти в [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 10-01-00219-а и 11-01-98508-р_восток_а) и ДВО РАН (гранты №№ 09-I-П29-01, 09-I-ОМН-03, 09-II-СУ03-003 и 09-III-A-03-07).

Литература

1. Алексеев Г.В., Терешко Д.А. Анализ и оптимизация в гидродинамике вязкой жидкости. Владивосток: Дальнаука, 2008. 365 с.
2. Gunzburger M.D., Hou L., Svobodny T.P. The approximation of boundary control problems for fluid flows with an application to control by heating and cooling // Comput. Fluids. 1993. Vol. 22. P. 239-251.
3. Ito K., Ravindran S.S. Optimal control of thermally convected fluid flows // SIAM J. Sci. Comput. 1998. Vol. 19, N 6. P. 1847-1869.
4. Алексеев Г.В. Разрешимость стационарных задач граничного управления для уравнений тепловой конвекции // Сиб. мат. журн. 1998. Т. 39, № 5. С.982-998.
5. Lee H.-C., Imanuvilov O.Y. Analysis of optimal control problems for the 2-D stationary Boussinesq equations // J. Math. Anal. Appl. 2000. Vol. 242. P. 191-211.
6. Алексеев Г.В. Обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений тепловой конвекции // Вестник НГУ, Серия: математика, механика и информатика. 2006. Т. 6, вып. 2. С. 6-32.
7. Sapatina A., Stavre R. A control problem in bioconvective flow // J. Math. Kyoto Univ. 1998. Vol. 37, N 4. P. 585-595.
8. Алексеев Г.В. Обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений теории массопереноса // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2002. Т. 42, № 3. С. 380-394.
9. Алексеев Г.В., Соболева О.В., Тучак М.Н. Обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений распространения загрязнений // Труды междунар. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Т. 1. Павлодар: ТОО НПФ «ЭКО», 2006. С. 93-102.
10. Алексеев Г.В., Соболева О.В., Терешко Д.А. Задачи идентификации для стационарной модели массопереноса // Прикл. мех. техн. физ. 2008. Т. 49, № 4.
11. Алексеев Г.В. Разрешимость обратных экстремальных задач для стационарных уравнений тепломассопереноса // Сиб. мат. журн. 2001. Т. 42, № 5. С. 971-991.
12. Алексеев Г.В. Коэффициентные обратные экстремальные задачи для стационарных уравнений тепломассопереноса // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2007. Т. 47, № 6. С. 1055-1076.

Оценивание сейсмоакустических эффектов техногенных взрывов с помощью сейсмических вибраторов

М.С. Хайретдинов, С.А. Авроров, Г.Ф. Седухина, А.А. Якименко

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Введение

Проблема прогнозирования геоэкологического воздействия разного типа техногенных взрывов – короткозамедленных карьерных [1,2], полигонных [3], от падающих ступеней ракет [4] и др. – на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру является весьма актуальной. Известно, что основные геоэкологические эффекты таких взрывов связаны с сейсмическими и акустическими воздействиями, формированием и распространением пылевого облака, электрических импульсов, воздушной ударной волны. Наибольший интерес представляет изучение сейсмического и акустического эффектов массовых взрывов, которые определяют целостность промышленных и жилых объектов, ударное воздействие на биообъекты. Подобные эффекты ранее рассматривались рядом авторов [1]. В тоже время следует отметить, что подобные эффекты в большей мере определяются совокупностью внешних факторов – направлением и силой ветра и температурной инверсией [5], турбулентностью атмосферы, а также рельефом местности. С учетом влияния отмеченных факторов возникает необходимость решения *проблемы прогнозирования* геоэкологического риска от техногенных одиночных и массовых взрывов. Это приводит к необходимости дополнительных исследований физических эффектов от подобных взрывов. Целью настоящей работы является изложение методологического подхода для проведения подобных исследований и некоторых полученных экспериментальных результатов.

Для проведения подобных исследований авторами предлагается подход, основанный на применении сейсмических вибраторов в качестве источников, имитирующих взрывы, но обладающих намного меньшей мощностью в сравнении ними. Очевидно, что при этом достигаются экологическая чистота и высокая повторяемость экспериментов. Это обусловлено высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками источников [6], гарантирующими высокую повторяемость результатов исследований в отличие от взрывов. Протяженные зондирующие сигналы от вибраторов в пунктах приема сворачиваются в короткие корреляционные (вибрационные) сейсмограммы, являющиеся аналогами взрывных сейсмограмм [6]. Обоснованием к использованию предлагаемого подхода к прогнозированию с помощью сейсмических вибраторов являются два важных обстоятельства:

1. Эквивалентность сейсмических волновых полей, порождаемых взрывами и вибраторами, в одинаковых условиях. Это доказано экспериментально с использованием принципа взаимности «источник-приемник» [7].
2. Способность вибраторов порождать одновременно как сейсмические, так и акустические колебания. Такая способность данного класса источников доказана авторами данной работы теоретически и многочисленными экспериментами [5].

Эквивалентность сейсмических волновых полей

Эквивалентность сейсмических волновых полей взрывов и вибраторов по кинематическим характеристикам изучалась в широком диапазоне дальностей «источник-приемник». Методика основывается на наблюдениях по встречному годографу, когда колебания от вибратора регистрировались вблизи места проведения карьерного взрыва, а сами карьерные взрывы регистрировались в месте расположения вибратора. По такой схеме в широком диапазоне дальностей «источник-приемник» авторами были получены взрывные сейсмограммы от короткозамедленных карьерных взрывов Кузбасса и вибрационные сейсмограммы от сейсмического вибратора ЦВ-100 [7]. Было показано, что структуры полученных сейсмограмм обладают высокой эквивалентностью по отношению к основным типам волн. В качестве обоснования этого утверждения на рис. 1 приводятся вибрационные сейсмограммы, зарегистрированные в районе угольного разреза «Бачатский» (Кузбасс) от центробежного вибромодуля ЦВ-100, расположенного на полигоне «Быстровка» в Новосибирской области (рис. 1,а) и взрывные сейсмограммы, зарегистрированные вблизи того же вибромодуля от карьерного взрыва, произведенного на том же разрезе (схема наблюдений на основе принципа обращения). Как следует из приведенных сейсмограмм они характеризуются высокой идентичностью продольных P и поперечных S волн. В целом результаты экспериментов по взаимности определяют правомочность использования предлагаемого подхода к проблеме прогнозирования с помощью сейсмических вибраторов.

Изучение сейсмоакустических эффектов от сейсмических вибраторов и взрывов.

Свойство вибраторов, излучать одновременно сейсмические и акустические волны, было изучено как теоретически, так и экспериментально [8]. Оба типа волн совместно могут распространяться на десятки

километров от источника. В качестве примера на рис. 2 иллюстрируются возможности одновременной регистрации сейсмических и акустических волн от сейсмического вибратора типа ЦВ-40 в варианте расстановки трехкомпонентных сейсмодатчиков типа СК1-П по окружности (на рисунке точки расстановки обозначены треугольниками) с радиусом 6 км. от источника.

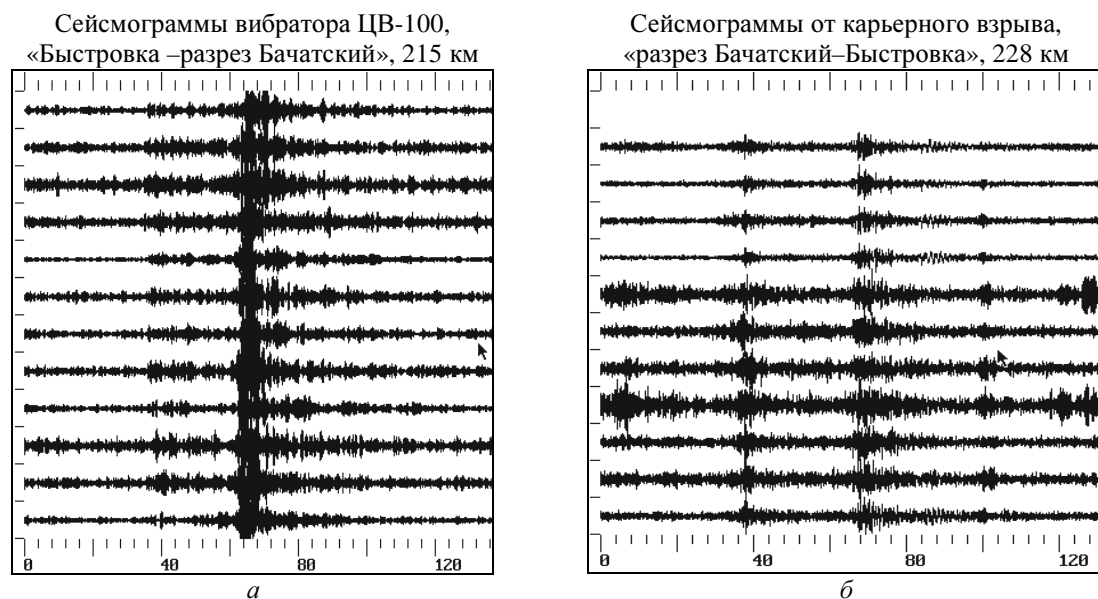


Рис. 1. Примеры вибрационных сейсмограмм.

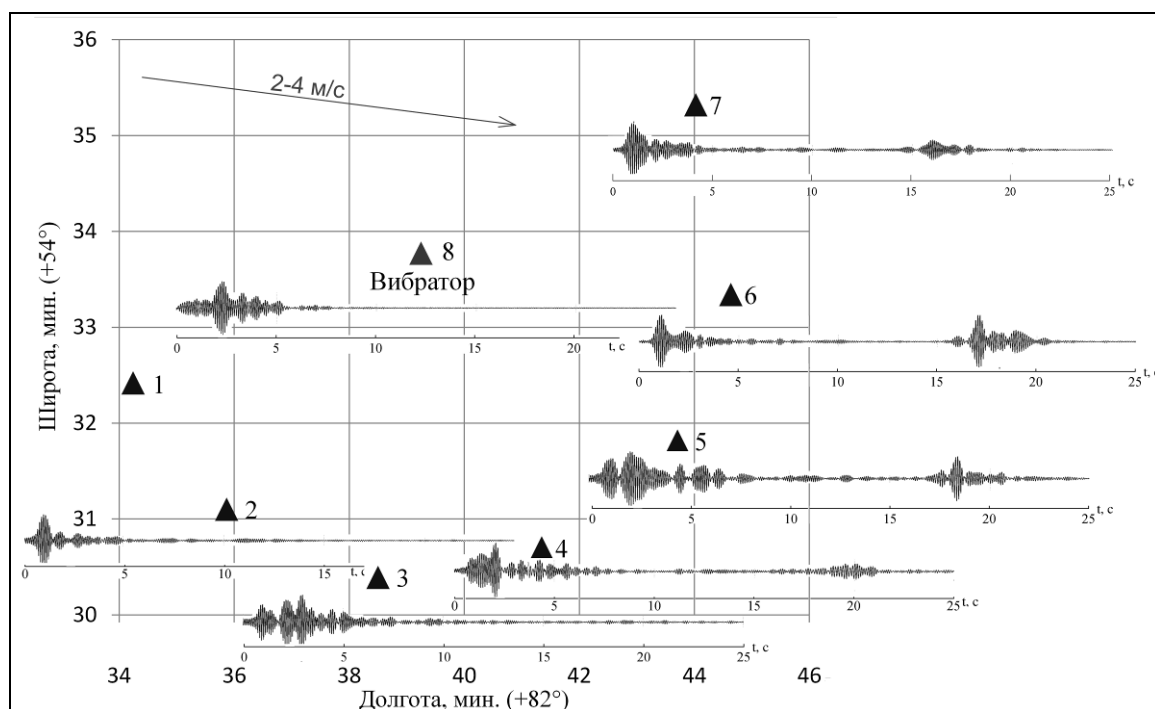


Рис. 2. Схема расстановки сеймостанций «Байкал» с трехкомпонентными датчиками СК1-П и СМЕ-3011, расположенными на окружности радиуса 6 км. Приведены вибрационные кореллограммы, иллюстрирующие вступление сейсмических и акустических волн. Стрелкой показано направление ветра.

В качестве результатов регистрации и обработки приведены вибрационные кореллограммы, получаемые как результат корреляционной свертки между опорным сигналом, повторяющим по форме зондирующий сигнал, и зарегистрированным исходным сигналом [6]. В результате получают вибрационные кореллограммы, являющиеся аналогами импульсных сейсмограмм и иллюстрирующие вступления сейсмических волн (волны первых вступлений) и акустических волн (вторичные волны) На рис. 2 стрелкой показаны направление и сила ветра. Как следует из рисунка, акустические волны хорошо выражены на сейсмограммах при совпадении направлений ветра и фронта распространения акустической волны. Это определяет роль метеоусловий в дальнем распространении акустических волн.

При этом важными являются количественные характеристики вариаций уровней сейсмических и акустических волн с учетом метеоусловий. Они могут быть охарактеризованы гистограммами амплитуд обоих типов волн в зависимости от азимутов (азимутальные гистограммы) распространения волн. Такие гистограммы, построенные по отношению к уже рассмотренному случаю регистрации (рис. 2), приведены на рис. 3. На рис. 3,а представлены трехкомпонентные (X,Y,Z) азимутальные гистограммы сейсмических волн P, на рис. 3,б – акустических волн. Такого типа графики отражают некоторые существенные особенности, отражающие процессы взаимодействия физических полей разной природы: сейсмических, акустических и метеорологических.

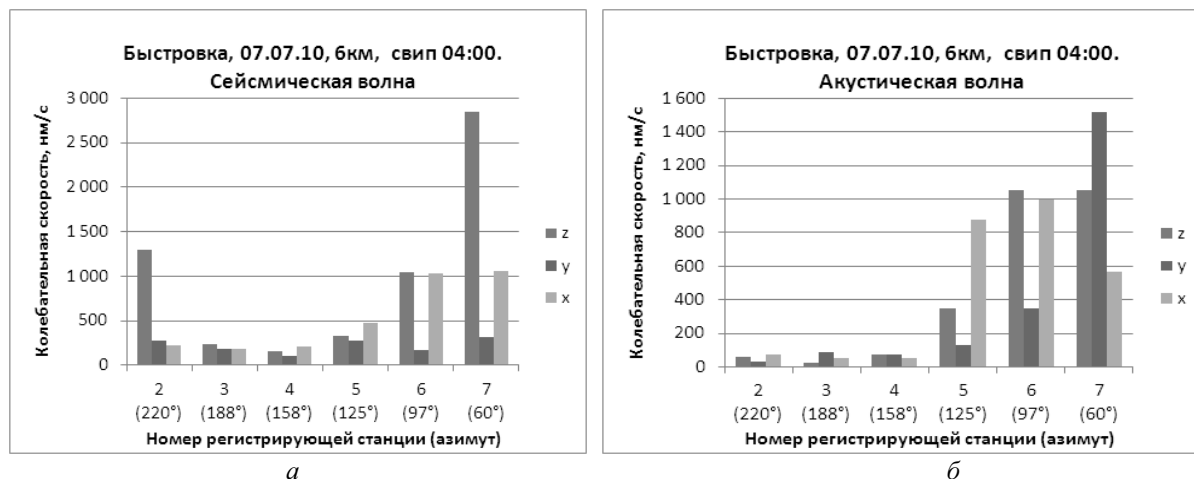


Рис. 3. Гистограммы амплитуд волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 с круговой расстановкой сейсмодатчиков с радиусом 6 км от источника : а – сейсмических волн P ; б – акустических волн.

Количественно акустический эффект как функция метеопараметров характеризуется значением углового сектора θ и акустической энергией E_a , которая концентрируется в его пределах. Другой характеристикой является соотношение максимального A_{\max} и минимального A_{\min} уровней акустических волн в пределах сектора в 360 град., характеризующее перераспределение энергии акустических волн в пространстве. Очевидно, что эти параметры, в свою очередь, сложным образом зависят от ряда других факторов: мощности исходного взрыва, направления и силы ветра, температурной инверсии, турбулентности атмосферы, рельефа местности и др.

В качестве примера акустического эффекта на рис. 3,б показано, что сектор нарастания уровня акустических волн при указанных на рис. 2 направлении и силе ветра 2-4 м/с занимает около 60 град. При этом перепад по уровню акустических волн A_{\max} / A_{\min} достигает в среднем 50 раз. Приведенный результат следует рассматривать как результат имитационного моделирования, показывающий, что метеозависимый акустический эффект необходимо учитывать при оценивании геоэкологической опасности взрывов для окружающей природной и социальной инфраструктуре.

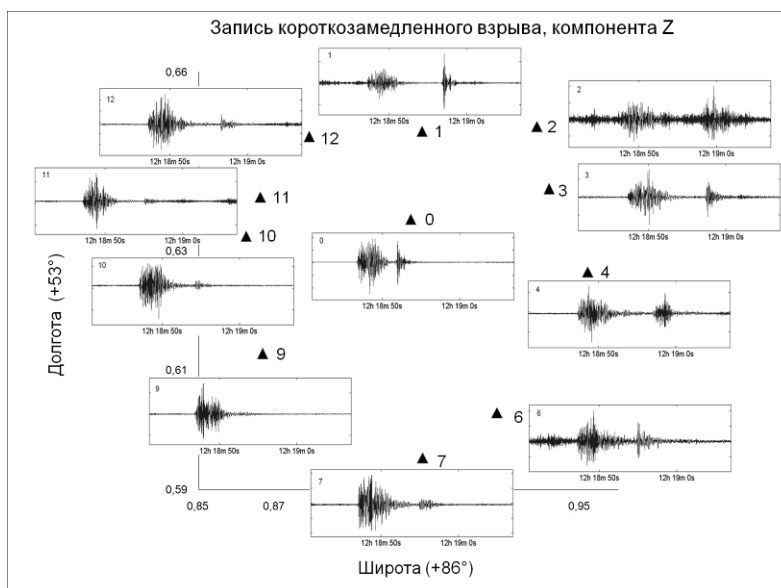


Рис. 4. Сейсмоакустические записи карьерного взрыва для случая круговой расстановки сейсмодатчиков.

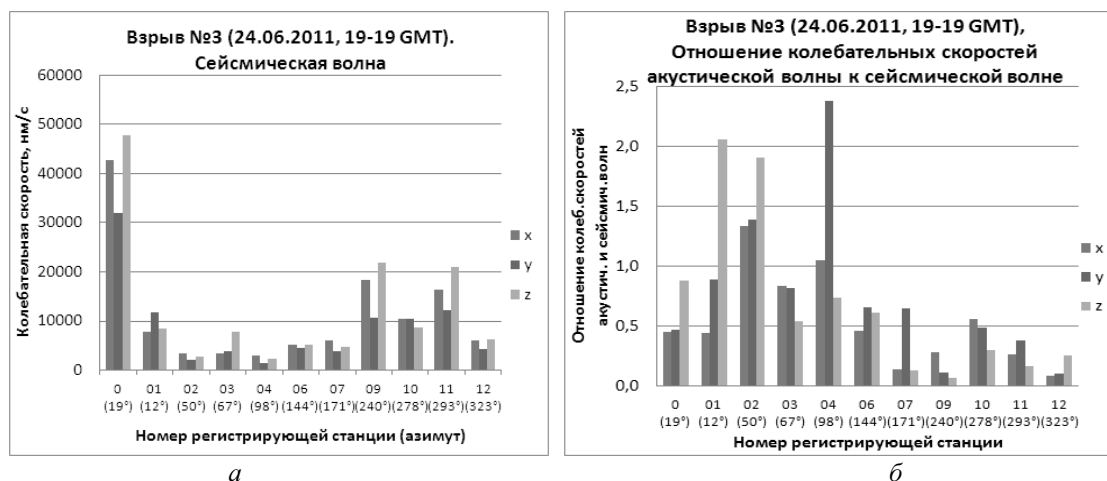


Рис. 5. Гистограммы амплитуд волн в функции азимута от коротко замедленного карьерного взрыва с круговой расстановкой сейсмодатчиков с радиусом 6 км от источника : *а* – сейсмических волн *P* ; *б* – парных отношений амплитуд акустических и сейсмических волн.

Следующая особенность явления взаимодействия сейсмических и акустических волн связана с тесной коррелированностью уровней акустических и сейсмических волн, проявляющаяся на датчиках 5,6,7 (рис. 3). Такая связь обусловлена явлением акустосейсмической индукции, развивающейся в приповерхностном волноводе. Подробно это явление изучено теоретически и экспериментально [6]

Сущность его состоит в том, что распространяющаяся в атмосфере вдоль дневной поверхности Земли акустическая волна возбуждает поверхностную сейсмическую волну (волну наведенной сейсмичности), которая и регистрируется сейсмическими датчиками по 3 компонентам. Гистограммы на рис. 3 подтверждают эту связь.

Приведенные результаты на рис. 2, 3 соответствуют частотному диапазону зондирующих вибросейсмических сигналов 6-12 Гц.

По аналогии с сейсмоакустическими экспериментами на основе использования вибраторов проведена серия экспериментов с карьерными взрывами Кузбасса. В качестве примера на рис. 4 представлена схема расстановки регистрирующей аппаратуры – мобильные станции «Байкал» в комплексе с трехкомпонентными сейсмодатчиками GS-3. Точки расстановки обозначены треугольниками. По аналогии с рис. 2 представлены записи сейсмических (первые вступления) и акустических (вторые вступления) волн. Как и в случае с вибратором ЦВ-40 представленные сейсмограммы отражают метеозависимый акустический эффект – преобладающие акустические волны регистрируются в направлении ветра (датчики 1-6). На противоположных датчиках акустические волны выражены слабо либо вовсе отсутствуют. Соответствующие гистограммы парных отношений амплитуд акустических и сейсмических (рис. 5,а) волн в функции азимута представлены на рис. 5,б. Для данных условий проведения взрыва и регистрации угловой сектор нарастания акустических волн составляет около 85 град, а соотношение преобладающих и минимальных уровней акустических волн составляет около одного порядка.

С целью оценивания диапазона частот, занимаемого волнами от взрыва, на рис. 6 приведены амплитудные спектры сейсмических и акустических волн. Как следует из спектров, преобладающий диапазон частот обоих типов волн лежит в пределах от 1 до 25 Гц, причем максимумы спектров на частоте f (обозначена на рис. 6), располагаются в пределах 7.8-12.3 Гц. С учетом результатов вибрационных и взрывных экспериментов следует, что метеозависимые геоакустические эффекты проявляются в широком спектре частот, лежащем в пределах 1-25 Гц.

Приведенные результаты экспериментов по выявлению метеозависимых акустических эффектов позволяют описать их с помощью функции направленности $F(\theta)$, которая может быть оценена по функции нарастания уровней акустических волн в пределах заданного углового сектора. В этом случае правомочно говорить об эффекте фокусировки акустосейсмических колебаний по пространству. Тогда акустическое давление, характеризующее воздействие воздушной волны на конструкции и биообъекты, может быть представлено с учетом [1] в виде:

$$P = 0.47K \cdot R^{-1/5} \cdot F(\theta),$$

где коэффициент K зависит от физико-механических свойств горных пород и возрастает от 0.5 до 1.5 при увеличении крепости пород; $R = r / q^{1/3}$, где r – абсолютное эпицентральное расстояние от взрыва в метрах, q – масса заряда взрывчатого вещества (ВВ).

В случае короткозамедленного взрыва большого числа скважин в качестве величины q выбирается масса ВВ в группе скважин.

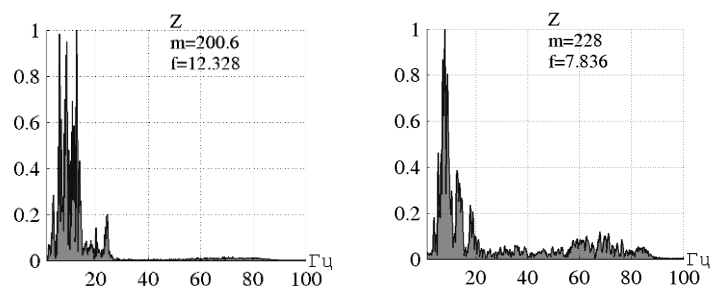


Рис. 6. Спектры сейсмической (слева) и акустической (справа) волн для карьерного взрыва.

С учетом приведенного соотношения метеозависимые эффекты распространения акустических волн от вибрационных источников в разном частотном диапазоне могут быть использованы для оценивания зональности сейсмоакустического геоэкологического воздействия на социальную инфраструктуру путем пересчета результатов измерений обоих полей к мощности взрывов.

Заключение

1. Предложен и экспериментально изучен новый подход к изучению влияния сейсмоакустических эффектов от техногенных взрывов – короткозамедленных карьерных, полигонных, от падающих ступеней ракет и др. – на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру. Подход основан на использовании метода вибрационного просвечивания Земли с помощью сейсмических вибраторов, отвечающих требованиям геоэкологической безопасности. Такие источники обладают высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, что гарантирует высокую повторяемость результатов исследований в отличие от взрывов. Это позволяет оценивать геоэкологические риски от взрывов для окружающей природной среде и социальной инфраструктуре в зависимости от геологических и метеорологических условий и параметров взрывной технологии. Основная цель разрабатываемого подхода связана с проблемой изучения воздействия короткозамедленных карьерных взрывов на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру.
2. Результатами экспериментальных исследований показано, что существующие на сегодня низко- и высокочастотные типы сейсмических вибраторов и компактных автономных сейсмостанций типа «RFТек», «Байкалы» в комплекте с трехкомпонентными малогабаритными сейсмодатчиками типа GS-3С позволяют охватить диапазон частот от 5 до 100 Гц, что позволяет с необходимой детальностью изучать особенности распространения сейсмических и акустических волн в районах карьеров в широком спектре частот и на разных азимутальных направлениях с учетом геологических и метеорологических условий и параметров взрывной технологии.
3. На основе экспериментальных данных показано, что при определенных внешних метеоусловиях соотношения максимальных и минимальных уровней акустических колебаний в зависимости от азимута достигают 50 и более раз, а сами акустические воздействия сопоставимы с сейсмическими. Показан эффект фокусировки акустосейсмических колебаний по пространству, который может нести в себе геоэкологическую угрозу окружающим биообъектам и строениям.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 10-07-00387-а и №11-07-10000-к).

Литература

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Соловьев С.П. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах // Геоэкол. Инженерная Геол. Гидрогеол. Геоэкология. 2000. № 6. С. 554-563.
2. Физические процессы в геосферах: их проявление и взаимодействие. М.: Наука, 1999.
3. Авроров С.А., Хайретдинов М.С. Автоматизированная процедура поточного обнаружения и идентификации сейсмических событий // Вестник НЯЦ РК. 2008. С.70-75
4. Краснов В.М., Дробжева Я.В., Маслов А.Н. Акустическое поле на земле при взрыве ракеты-носителя // Вестник НЯЦ. 2006. Вып. 2. С. 79-85.
5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И. и др. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. АН, 1996. Т. 346, № 5. С.664-667.
6. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / Отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал "Гео" Издательства СО РАН, 2004. 387 с.
7. Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Ковалевский В.В. и др. Экспериментальные исследования по калибровке сейсмических трасс в Западной Сибири и Алтае-Саянском регионе // Вест. НЯЦ РК. 2004. Вып. С. 28-34.
8. Glinskii V.M., Kovalevskii V.V., Khairtdinov M.S. Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes // Geology and Geophysics. 1999. Vol. 40, N 3. P. 422-431.

Волны-убийцы в океане: численное моделирование

Р.В. Шамин, А.И. Смирнова, А.В. Горленко, А.В. Юдин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Новосибирский государственный университет

Введение

В последнее время большое количество научных работ посвящено изучению волн-убийц в Мировом океане. Действительно, эти волны представляют собой внезапные одиночные волны огромной амплитуды (более 30 м). Такие аномально большие волны, в русскоязычной научной литературе называемые волнами убийцами, представляют собой серьезную опасность, как для крупных судов, так и для морских сооружений. Описание многочисленных катастрофических случаев, связанных с волнами убийцами можно найти в монографиях: [2, 14]. По объективным причинам изучение таких волн непосредственно в океане с помощью натуральных экспериментов является очень затрудненным. С другой стороны попытки изучения волн-убийц с помощью лабораторных экспериментов также оказываются очень сложными. Наиболее перспективным методом изучения таких волн становится вычислительный эксперимент. Отметим некоторые работы, посвященные волнам-убийцам: [1, 6, 12, 15, 17].

С помощью вычислительных экспериментов можно изучать различные аспекты волн-убийц. Наиболее актуальными нам представляются следующие направления в изучении волн-убийц с помощью вычислительных методов:

- 1) получение характерных портретов волн-убийц;
- 2) получение оценок вероятностей возникновения волн-убийц в зависимости от параметров начального волнения;
- 3) изучение качественных характеристик волн-убийц;
- 4) выяснение вопросов устойчивости волн-убийц относительно внешних возмущений;
- 5) изучение динамических процессов во время образования волн-убийц;
- 6) моделирование воздействия волн-убийц на суда и морские сооружения.

Для решения указанных проблем необходимо иметь хорошо разработанный инструментарий для проведения вычислительных экспериментов и обработки результатов. В частности, необходимо иметь средства для моделирования волн-убийц, удовлетворяющие следующим требованиям:

высокая точность проводимых расчетов;

- 1) проведение расчетов на больших временных интервалах;
- 2) построение начальных данных, соответствующих волнам в океане;
- 3) достаточно высокая скорость проведения расчетов.

В настоящей работе рассматриваются математические модели, основанные на динамических уравнениях в конформных переменных. Эти уравнения рассматривались в ряде работ [5, 13, 16]. Мы будем использовать вариант уравнений, предложенный в работах [3, 19]. Эти уравнения являются эквивалентными уравнениям Эйлера, описывающим нестационарное потенциальное течение идеальной жидкости со свободной поверхностью. Многие научные работы, посвященные волнам убийцам, основаны на этих уравнениях. Практика их использования показала, что эти уравнения обладают рядом превосходных качеств:

- 1) простота программирования численных методов
- 2) очень высокая точность расчетов
- 3) возможность проводить расчеты на огромных временных интервалах
- 4) вычислительная устойчивость численных схем

Помимо вычислительного аспекта эти уравнения оказались очень удобными и для теоретического изучения. В цикле работ [7-11] были изучены вопросы существования и единственности решений, оценка времени существования, сходимости численных методов.

Вычислительная экспериментальная установка

Для решения указанных выше задач по изучению волн-убийц в лаборатории нелинейных волновых процессов Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН под руководством академика РАН В.Е.Захарова развернуты работы по созданию мощной вычислительной экспериментальной установки, под названием RWSH (Rogue Waves Simulation Host). Данная установка представляет собой масштабируемый программный комплекс, позволяющий проводить вычислительные эксперименты по моделированию нелинейной динамики поверхностных волн идеальной жидкости. С помощью данного комплекса возможно проводить самые различные вычислительные эксперименты с нелинейными волнами на воде. Можно проводить как единичные эксперименты, так и потоковые однотипные эксперименты. Вычислительная установка может быть развернута как на персональном компьютере, так и на высокопроизводительных кластерах. Приведем основные блоки системы RWSH:

- 1) интерфейсный блок построения начальных условий;
- 2) ядро расчетов;

- 3) модуль визуализации;
- 4) база данных;
- 5) сайт в Интернет для удаленного управления расчетами и доступа к результатам экспериментов.

С помощью вычислительной экспериментальной установки уже были получены важные результаты о вероятности возникновения волн-убийц, представленные в работе [4].

Отметим, что помимо чисто научных задач данный комплекс играет важную роль и в привлечении к научной работе молодежи – прежде всего, студентов. Так, части программного комплекса RWSH были представлены на авторитетном международном конкурсе Imagine Cup 2011.

Основные уравнения

В настоящей работе моделирование волн-убийц основано на численном решении уравнений, описывающих нестационарное течение идеальной жидкости со свободной поверхностью. Мы будем рассматривать плоское течение с бесконечно глубоким дном. По горизонтальной переменной мы будем рассматривать 2π -периодические условия. Такие предположения являются естественными для моделирования волн-убийц.

Пусть идеальная жидкость занимает бесконечную область (в переменных (x, y)), ограниченную криволинейной границей. Мы вводим комплексную плоскость $z = x + iy$. Эту область мы можем (по теореме Римана) конформно отобразить на нижнюю полуплоскость с переменными $w = u + iv$.

Обратное конформное отображение выражается аналитической функцией

$$z = z(t, w).$$

Эта функция является также функцией времени, поскольку мы рассматриваем нестационарную задачу. Зная функцию $z(t, u)$, мы можем восстановить профиль свободной поверхности. Для описания потенциального течения идеальной жидкости необходимо также знать потенциал скоростей. Поскольку потенциал является гармонической функцией, то все его значения могут быть описаны значением этого потенциала лишь на границе области. Пусть $\psi(t, x)$ – значение потенциала скоростей на свободной поверхности. Соответственно, через $\Phi(t, z)$ мы обозначим аналитическую в нижней полуплоскости функцию такую, что $\text{Re } \Phi(t, x) = \psi(t, x)$. Будем рассматривать функцию $\Pi(t, w) = \Phi(t, z(t, w))$, которая также будет аналитичной в нижней полуплоскости. Теперь мы введем новые переменные:

$$R(t, w) = \frac{1}{z'(t, w)}, \quad V(t, w) = i \frac{\Pi'(t, w)}{z'(t, w)}.$$

Здесь и далее штрихом мы обозначаем производную по переменной w . Эти функции являются аналитическими в нижней полуплоскости и удовлетворяют краевым условиям:

$$\begin{aligned} R(t, w) &\rightarrow 1, \quad \text{Im } w \rightarrow -\infty, \\ V(t, w) &\rightarrow 0, \quad \text{Im } w \rightarrow -\infty. \end{aligned}$$

Поскольку мы рассматриваем поверхностные волны 2π -периодические по переменной x , то и функции R и V также будут 2π -периодическими по переменной u . Тогда функции R и V можно представить в виде рядов Фурье:

$$R(w, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k(t) e^{-ikw}, \quad V(w, t) = \sum_{k=1}^{\infty} v_k(t) e^{-ikw}.$$

Функции R и V полностью описывают динамику поверхностных волн идеальной жидкости. При этом нам достаточно знать лишь значения этих функций на вещественной оси (при $v = 0$) поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать аргумент u вместо w .

Покажем, как с помощью этих функций восстановить свободную поверхность и значение потенциала на свободной поверхности. Для функции $\frac{1}{R}$ имеет место представление

$$\frac{1}{R} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) e^{-iku}.$$

Значения коэффициентов c_k несложно получить рекуррентно из соотношения

$$\left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) e^{-iku} \right) \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k(t) e^{-iku} \right) = 1.$$

Умножением рядов можно получить разложение

$$-i \frac{V(t, u)}{R} = \sum_{k=1}^{\infty} d_k(t) e^{-iku}.$$

Теперь восстановим функцию $z(u, t)$ следующим образом:

$$z(t, u) = u + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{-ik} c_k(t) e^{-iku},$$

а функцию $\Pi(u, t)$ – по формуле:

$$\Pi(t, u) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{-ik} d_k(t) e^{-iku}.$$

Свободную поверхность мы получим как геометрическое место точек по следующему правилу:

$$\Gamma(t) = \{(\operatorname{Re} z(t, u), \operatorname{Im} z(t, u)) : u \in (0, 2\pi)\}.$$

Значение потенциала на свободной поверхности находится по формуле:

$$\Psi(t, u) = \operatorname{Re} \Pi(t, u).$$

Функции R и V удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{R}(t, u) &= i(U(t, u)R'(t, u) - U'(t, u)R(t, u)), \\ \dot{V}(t, u) &= i(U(t, u)V'(t, u) - B'(t, u)R(t, u)) + g(R(t, u) - 1), \\ 0 < u < 2\pi, 0 < t < T, \\ R(t, 0) &= R(t, 2\pi), V(t, 0) = V(t, 2\pi), 0 < t < T, \\ R(0, u) &= R_0(u), V(0, u) = V_0(u), 0 < u < 2\pi. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь функции U и B вычисляются по формулам:

$$U = P(V\bar{R} + \bar{V}R), \quad B = P(V\bar{V}), \quad P = \frac{1}{2}(I + iH).$$

Численные методы

Рассмотрим построение численных методов для моделирования системы (1). Поскольку рассматриваемая система уравнений является системой эволюционных дифференциальных уравнений в частных производных, то мы будем использовать проекционный метод сведения к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Учитывая, что система (1) является системой интегро-дифференциальных уравнений, то мы будем использовать представление неизвестных функций с помощью рядов Фурье.

Пусть $N \geq 1$ – фиксированное число размерности приближенной задачи. Приближенные решения будем искать в виде

$$R^N(t, u) = 1 + \sum_{k=1}^N r_k^N(t) e^{-iku}, \quad V^N(t, u) = \sum_{k=1}^N v_k^N(t) e^{-iku}.$$

Использование представления в виде конечных сумм Фурье имеет существенные преимущества при вычислении оператора P . Действительно, пусть

$$h = \sum_{k=-N}^N h_k e^{-iku},$$

тогда мы имеем

$$P[h] = \frac{h_0}{2} + \sum_{k=1}^N h_k e^{-iku}.$$

Поскольку операция умножения функций не является замкнутой в классе функций, представимых в виде конечных сумм Фурье, введем бинарную операцию $*$, которая является замкнутой для множества таких функций. Пусть

$$A = \sum_{k=-N}^N a_k e^{-iku}, \quad B = \sum_{k=-N}^N b_k e^{-iku}.$$

Тогда для $C = AB$ имеем

$$C = \sum_{k=-2N}^{2N} c_k e^{-iku}.$$

Операцию $*$ введем следующим образом

$$A * B = \sum_{k=-N}^N c_k e^{-iku},$$

где c_k – коэффициенты Фурье функции C .

Приближенные решения R^N и V^N будем искать как решения системы уравнений

$$\begin{aligned} R_t^N &= i(U^N * R_u^N - U_u^N * R^N), \\ V_t^N &= i(U^N * V_u^N - B_u^N * R^N) + g(R^N - 1), \end{aligned}$$

где

$$U^N = P(V^N * \bar{R}^N + \bar{V}^N * R^N), B = P(V^N * \bar{V}^N).$$

Полученная система является системой обыкновенных дифференциальных уравнений относительно коэффициентов Фурье функций R и V . Эта система обыкновенных дифференциальных уравнений уже может быть решена численно с помощью стандартного метода Рунге-Кутты 4-го порядка.

Обор результатов численного моделирования

В предыдущем пункте мы привели формулы для численного расчета динамики поверхностных волн на воде. В частности по этим формулам можно рассчитывать волны-убийцы. Приведем некоторые результаты вычислительных экспериментов, в которых изучались волны-убийцы.

На рис. 1 мы приводим профиль характерной волны-убийцы, возникшей в ходе нелинейной динамики поверхностных волн в океане. Начальные данные соответствовали волнам, бегущим в одну сторону, что в океане соответствует морской зыби.

В совместных работах с академиком РАН В.Е. Захаровым проводились масштабные вычислительные эксперименты по моделированию волн-убийц с целью получения вероятности возникновения волн-убийц. Результаты этих исследований можно найти в работах [4, 18].

С помощью нашей вычислительной экспериментальной установки мы проводили также численные опыты по исследованию вопросов устойчивости волн-убийц относительно внешних воздействий и возмущения начальных данных. На рис. 2 мы приводим сравнительные графики профиля волны-убийцы и этой же волны, рассчитанной при наличии внешнего возмущения.

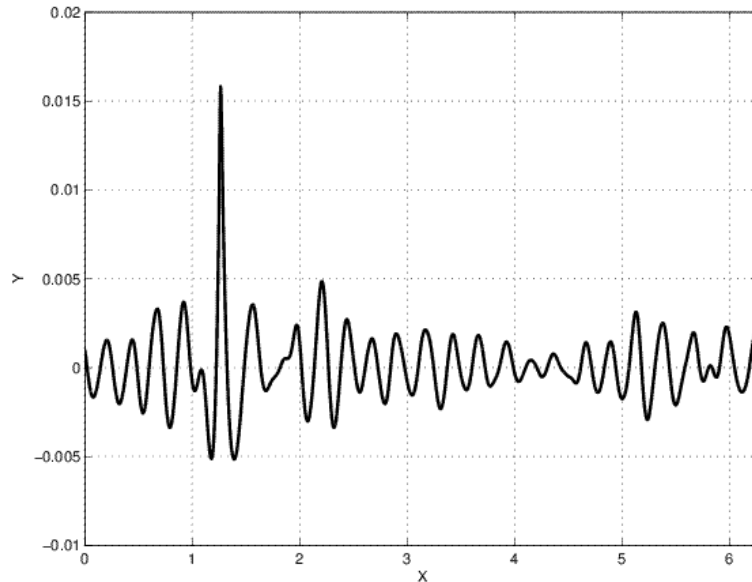


Рис. 1. Характерный профиль волны-убийцы.

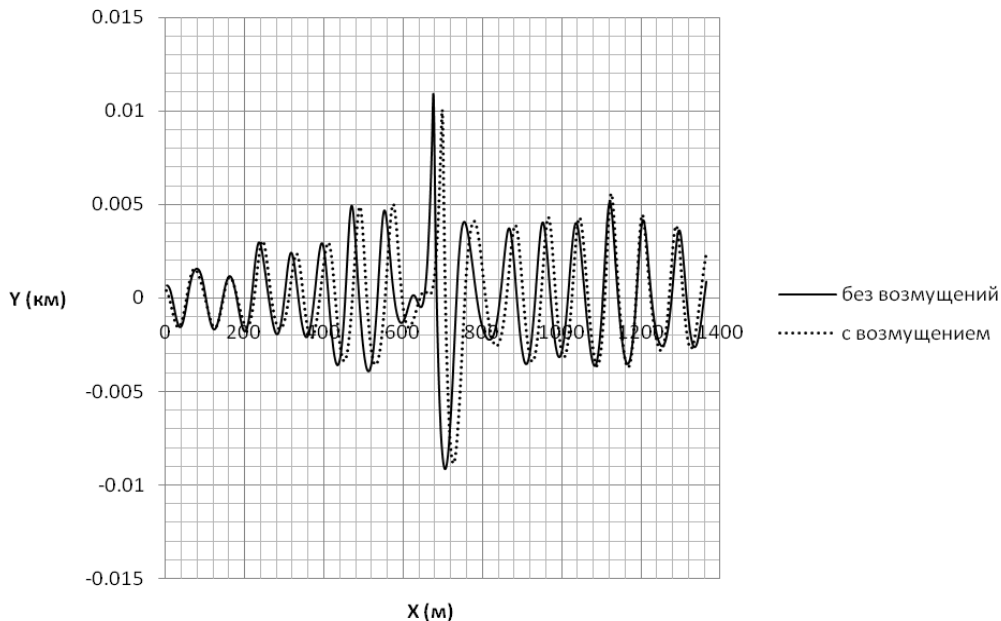


Рис. 2. Устойчивость волны-убийцы относительно внешнего возмущения.

Из этого рисунка и из многочисленных подобных численных опытов можно заключить, что волн-убийцы в океане представляют собой устойчивый объект относительно внешнего (ветрового) возмущения.

Заключение

В настоящем кратком обзоре мы рассмотрели чрезвычайно эффективные методы моделирования волн на воде, которые мы использовали для изучения волн-убийц в океане. Центральное место мы уделили достаточно подробному изложению численных методов, с помощью которых мы проводили вычислительные эксперименты. Отметим, что использование техники конформных переменных для расчета нелинейной динамики поверхностных волн идеальной жидкости, позволяет использовать достаточно простые численные методы, которые отличаются вычислительной устойчивостью. Приведенные формулы в разделах 3 и 4 могут быть легко реализованы на обычных персональных компьютерах.

Авторы благодарят академика РАН В.Е. Захарова за внимание и постоянную поддержку нашей работы. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НШ-7550.2006.2 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН «Математические методы в нелинейной динамике», а также при поддержке гранта Правительства РФ для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования (Договор № 11.G34.31.0035 от 25 ноября 2010 между МинОбрНауки РФ, НГУ и ведущим ученым).

Литература

1. Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Рожков В.А. Физика и статистика необычных морских ветровых волн // Известия Русского географического общества. 2005. Т. 137, Вып. 6. С. 19-28.
2. Давидан И. Н., Лопатухин Л. И. На встречу со штормами. Л.: Гидрометеиздат, 1982.
3. Дьяченко А.И. О динамике идеальной жидкости со свободной поверхностью // Докл. Акад. наук. 2001. Т. 376, № 1. С. 27-29.
4. Захаров В.Е., Шамин Р.В. О вероятности возникновения волн-убийц // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91, Вып. 2. С. 68-71.
5. Овсянников Л.В. К обоснованию теории мелкой воды // Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики. Новосибирск, 1973. Вып.15. С. 104-125.
6. Рубан В.П. Гигантские волны в слабо-скрепленных состояниях морской поверхности // ЖЭТФ. 2010. Т. 137, № 3. С. 599-607.
7. Шамин Р.В. Вычислительные эксперименты в моделировании поверхностных волн в океане. М.: Наука, 2008.
8. Шамин Р.В. Динамика идеальной жидкости со свободной поверхностью в конформных переменных // Современная математика. Фундаментальные направления. 2008. Т. 28. С. 3-144.
9. Шамин Р.В. К вопросу об оценке времени существования решений системы Коши-Ковалевской с примерами в гидродинамике со свободной поверхностью // Современная математика. Фундаментальные направления. 2007. Т. 21. С. 133-148.
10. Шамин Р.В. Об одном численном методе в задаче о движении идеальной жидкости со свободной поверхностью // Сибирский журнал вычислительной математики. 2006. Т. 9, № 4. С. 379-389.
11. Шамин Р.В. Поверхностные волны на воде минимальной гладкости // Современная математика. Фундаментальные направления. 2010. Т. 35. С. 126-140.
12. Chalikov D. Freak waves: Their occurrence and probability // Phys. Fluids. 2009. Vol. 21, Is. 7. P. 076602-1-076602-18.
13. Chalikov D., Sheinin D. Modeling of Extreme Waves Based on Equations of Potential Flow with a Free Surface // Journ. Comp. Phys. 2005. Vol. 210. P. 247-273.
14. Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. Rogue Waves in the Ocean. Springer, 2009.
15. Slunyaev A. Freak wave events and the wave phase coherence // The European Physical Journal - Special Topics. 2010. Vol. 185, N 1. P. 67-80.
16. Whitney J.C. The numerical solution of unsteady free-surface flows by conformal mapping // Proc. Second Inter. Conf. on Numer. Fluid Dynamics (ed. M. Holt).. Springer-Verlag, 1971. P. 458-462.
17. Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Prokofiev A.O. Freak waves as nonlinear stage of Stokes wave modulation instability // Eur. J. Mech. B Fluids. 2006. Vol. P. 677-692.
18. Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Shamin R.V. How probability for freak wave formation can be found // The European Physical Journal - Special Topics. 2010. Vol. 185, N 1. P. 113-124.
19. Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Vasilyev O.A. New method for numerical simulation of a nonstationary potential flow of incompressible fluid with a free surface // Eur. J. Mech. B Fluids. 2002. Vol. 21. P. 283-291.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНОГЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ**

Влияние изменчивости метеорологических параметров и дисперсного состава атмосферных выбросов на модельные оценки осаждения промышленной пыли

А.А. Быков, Е.Л. Счастливец, С.Г. Пушкин

Институт вычислительных технологий СО РАН (кемеровский филиал), Кемерово

Введение

Одной из составляющих частей мониторинга промышленных выбросов и загрязнения воздуха являются модельные оценки распространения загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере [10]. Известно, что для этого существует целый ряд моделей, различных по научной основе, пространственным и временным характеристикам. Однако в России, как и в каждой стране, существует единая инженерная (регуляторная) модель ОНД-86 [12] для государственного управления выбросами промышленных предприятий в атмосферу. Она обязана обеспечивать воспроизводимость и сопоставимость проектных расчетов, поэтому базируется на однозначно трактуемых инструкциях и зависимостях и использует стандартизированные исходные данные.

Модель [12] предназначена для вычисления максимальных разовых (осредненных за 20 минут) концентраций ЗВ в приземном слое. Именно они не должны превышать разовые предельно допустимые концентрации (ПДК) при определении допустимости воздействия предприятия на атмосферный воздух. Другие модели и других показатели не являлись нормативными и не влияли до 01.03.2008 на принятие решений о допустимости строительства предприятий, определения размеров их санитарно-защитных зон (СЗЗ) и установлении предельно-допустимых выбросов. Однако 01.03.2008 вышел новый документ [14], где появилось требование о том, что при установлении СЗЗ для предприятий 1-го и 2-го классов опасности необходима оценка рисков здоровью населения, которые в плане загрязнения атмосферы базируются на среднегодовых концентрациях [13]. Для этой цели в ГГО им. А.И. Воейкова разработана в качестве дополнения к ОНД-86 нормативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период [8,11]. Рассмотренные выше документы относятся только к концентрациям ЗВ в атмосфере и не рассматривают вопросы поступления ЗВ из атмосферы в объекты, расположенные на земной поверхности.

Выбросы такого крупного угледобывающего промышленного региона, как Кузбасс, характерны тем, что содержат большой процент пылевых частиц разнообразного химического состава, обладающих эффектом оседания на подстилающую поверхность. При этом не исключена ситуация, когда промышленные выбросы, будучи допустимыми с точки зрения максимального разового загрязнения атмосферы, могут привести к весьма существенному накоплению вредных веществ на поверхности. Многолетнее оседание из атмосферы и накопление в почве техногенной пыли может снизить урожайность земель и повысить содержание ЗВ в сельскохозяйственной продукции до величин, превосходящих допустимые нормы. Загрязнение снегового покрова в течение зимнего периода с последующим стоком талых вод в водоемы может значительно ухудшить качество воды. Таким образом, изучения процессов вторичного поступления ЗВ из атмосферы в почву, воду и продукты питания требует самого пристального внимания.

Модель расчета выпадения техногенной пыли

Для проведения количественной оценки осаждения твердых частиц на заданную территорию авторами разработана и доведена до практического использования модель расчета потока пылевых частиц промышленного происхождения на подстилающую поверхность. Модель базируется на работах [6,9] и дает возможность по данным о параметрах ИЗА, фракционному составу выбрасываемой пыли и климатическим параметрам территории оценить среднегодовую приземную концентрацию q , мокрый поток на подстилающую поверхность (вымывание) P_m , сухой поток (осаждение) P_c и полный поток P , представляющий собой сумму двух названных составляющих $P = P_m + P_c$.

Расчет среднегодового мокрого потока P_m , г/(м²год), загрязняющих веществ, выбрасываемых одиночным точечным источником загрязнения атмосферы (ИЗА), на подстилающую поверхность в заданной точке осуществляется по формуле [9]:

$$P_m = \frac{(1+b)M}{2\pi ur L_0} \left[a L_n t_{en} \sum_{i=1}^k m_i y_i \exp\left(-\frac{ay_i r}{u}\right) + L_s t_{es} \sum_{i=1}^k m_i y_i \exp\left(-\frac{y_i r}{u}\right) \right], \quad (1)$$

где b - относительный вклад смешанных атмосферных осадков в их общее количество; M - масса твердых ЗВ, выбрасываемых ИЗА в течение года, г/год; \bar{u} - среднегодовая средняя скорость ветра в слое распространения примесей, м/сек; r - расстояние от ИЗА, м; L_0 - повторяемость направления ветра данного румба для круговой розы ветров; a - эмпирическая поправка на отличие в интенсивности вымывания жидкими и твердыми осадками; L_n , L_s - повторяемости направлений ветра данного румба

для летней и зимней розы ветров соответственно; t_{b1}, t_{b2} - относительные (в долях года) продолжительности выпадения жидких и твердых осадков; K - число рассматриваемых фракций частиц; m_i - доля общей массы выброса, приходящейся на i -ю фракцию частиц; y_i - постоянная вымывания i -й фракции, c^{-1} .

Среднегодовой сухой поток частиц P_c , $г/(м^2 \text{ год})$, оценивается в виде суммы [9]:

$$P_c = \sum_{i=1}^K (V_{iz}t_{cz} + V_{il}t_{cl}) q_i(m_i M, r, \phi), \quad (2)$$

где r и ϕ - полярные координаты расчетной точки относительно источника и направления на север; V_{iz}, V_{il} - скорости осаждения i -й фракции частиц в зимний и летний периоды, $м/сек$; t_{cz} - продолжительность периода залегания снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков в этот период, $сек$; t_{cl} - продолжительность периода отсутствия снежного покрова за вычетом времени выпадения осадков, $сек$; q_i - среднегодовая приземная концентрация i -й фракции, $г/м^3$. Расчет производится в каждой интересующей точке отдельно по фракциям частиц с различными параметрами осаждения, после чего результаты складываются для получения суммарного P_c для данного ИЗА. Для множества источников осаждение в расчетной точке есть сумма по отдельным ИЗА.

Соотношения (1) и (2) показывают, что в рамках принятой модели можно легко оценить сезонное выпадение. В частности, для расчета осаждения в снеговой покров (зимний период) достаточно положить $t_{bz} = t_{bz} = 0$ и использовать суммарный выброс M для каждого ИЗА только за зимний период. При расчете среднегодовых концентраций q_i следует, естественно, использовать только зимнюю розу ветров L_z и другие необходимые метеопараметры и их распределения за зимний период.

Возможные причины погрешностей моделирования

Все упомянутые выше расчетные схемы программно реализованы в составе широко используемого для проектных и управленческих работ в Сибирском регионе программного комплекса “ЭРА” [5] (подробнее см. www.logos-plus.ru). Это позволяет использовать накопленные в форматах данного комплекса исходные данные для научных исследований, не входящих в состав регламентированных нормативными документами проектных работ.

Результаты опытной эксплуатации модели и ее сопоставление с данными натурных наблюдений рассматривались в статьях авторов [2,4]. Проведенные там практические расчеты для промышленных объектов Кемеровской области, показывают, что построенная модель, несмотря на простоту, достаточно хорошо отражает тенденции осаждения частиц по исследуемой территории. Что касается количественного сопоставления, то расчетные оценки, как правило, существенно превосходят результаты натурных наблюдений (в нормативных базах выбросы источников указаны на максимальную производительность предприятий). Тем не менее, обычно удается подобрать единый для всех экспериментальных точек множитель, после которого общий ход расчетных и измеренных величин совпадает так, что его вряд ли можно назвать случайным.

Причинами расхождения расчетных и измеренных величин могут быть погрешности модели, неточности исходных данных, погрешности проведения самих замеров и т.д. Для выяснения вопроса о том, что в наибольшей степени влияет на результат моделирования, рассмотрим влияние модельных соотношений и основных исходных данных.

Вымывание P_m определяется в первую очередь интенсивностью осадков, их способностью захватывать частицы примеси и скоростью ветра в слое распространения примесей. Как показывают численные эксперименты, характер кривой убывания по расстоянию от источника в формуле (1) слабо влияет на конечный результат при осреднении за год или сезон. Поэтому влияние мокрого осаждения определяется не столько видом зависимости (1), сколько обоснованностью задания входящих в эту зависимость параметров. Кроме того, как отмечается в [6], вымывание дает заметный вклад только вблизи источника.

Результат расчета сухого осаждения зависит главным образом от модели расчета среднегодовых (среднесезонных) концентраций q_i , входящих в выражение (2). Известно, что построение таких моделей в большинстве случаев основано на расчете концентраций при заданных метеоусловиях с последующим осреднением с известных распределениями мощностей выбросов и метеоусловий в течение года (сезона).

Основное соотношение, используемое в [11] для вычисления средней за заданный период времени концентрации некоторой примеси $q(M_o, r, \phi)$ в полярных координатах r, ϕ имеет вид:

$$q(M_o, r, \phi) = \frac{P_1(\phi) M_o}{r} \int_0^\infty du \int_0^\infty d\lambda p_2(u) p_3(\lambda) q_o(r, u, \phi, \lambda, H_e). \quad (3)$$

Расшифровка обозначений, формулы для подинтегральной функции q_o и эффективной высоты источника H_e представлены в [6], M_o – средний выброс источника за период осреднения.

Для практического использования соотношения (3), в дополнение к стандартным данным, необходимо задать для интересующего периода осреднения плотности распределения трех метеорологических параметров: направления ветра $p_1(\phi)$; скорости ветра $p_2(u)$ и интенсивности турбулентного перемешивания $p_3(\lambda)$. Здесь: $\lambda = 1.15K_1/u_2$; K_1 - значение коэффициента турбулентности на уровне 1 м, определенное согласно Наставлению по наблюдениям на теплбалансовых станциях; u_2 - измеренное в рассматриваемый срок значение скорости ветра на уровне 2 м. Метод перехода от стандартной 8-и румбовой розы ветров, которая представлена в выражении (1) как L_n и L_s , к функции $p_1(\phi)$ описан в [11], а рекомендуемый вид распределений $p_2(u)$ и $p_3(\lambda)$ приведен в [8].

В предыдущих методических указаниях [9] предлагалась модель расчета осредненных за длительный период концентраций с упрощенной технологией вычислений, где вместо интегралов используются средние значения скорости ветра \bar{u} (как в формуле (1)) и показателя стратификации атмосферы A , установленного для различных районов РФ с целью единообразного использования нормативной методики ОНД-86. Сами же приближенные формулы, представленные в [9], дают возможность пересчитать аналог функции q_o через параметры источника, предназначенные для расчета максимального разового загрязнения атмосферы.

Обе модели реализованы в программном комплексе ЭРА, причем расчетный модуль для модели [11] протестирован и согласован экспертами ГГО им А.И. Воейкова для использования в проектных работах. Обе модели используют единые входные данные по источникам и процедуру сглаживания розы ветров. Один из примеров сравнения результатов расчетов с использованием этих моделей представлен на рис. 1. Эти расчеты были проведены для неорганизованного площадного пылящего источника с высотой 12 метров и горизонтальными размерами 60×100 метров. Такой источник является характерным (размеры, конечно, могут быть различные) для угольной промышленности и является в нормативных базах приближением угольных складов или отвалов породы. Метеорологические данные соответствуют метеостанции г. Белово за зимний сезон 2009-2010 годов. Эта станция является представительной для большей части Ерунаковского угледобывающего района Кузбасса, который весьма интенсивно разрабатывается в настоящее время.

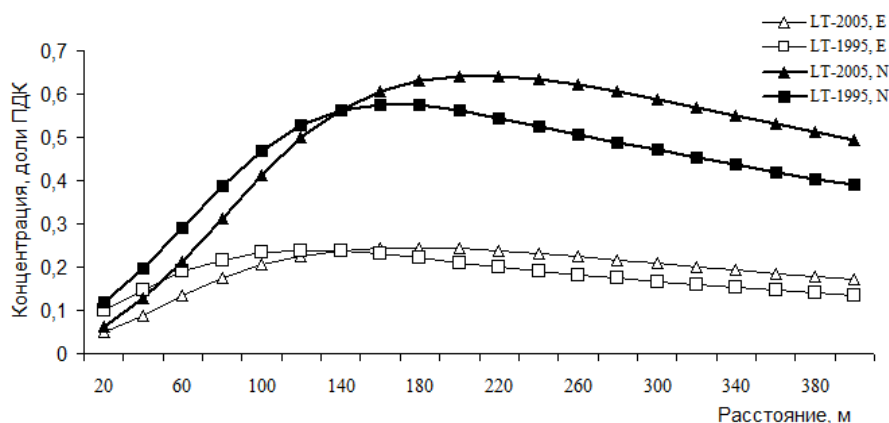


Рис. 1. Сравнение среднегодовой концентрации (в долях ПДК) газообразной примеси, рассчитанной по моделям [11] (LT-2005) и [9] (LT-1995). Верхняя пара кривых (жирные линии) соответствует северному (N) направлению ветра, а нижняя – западному (E).

Рис. 1 показывает, что использование различных моделей для расчета концентрации, скорее всего, не может являться причиной больших ошибок при расчете сухого осаждения. Это также согласуется с выводом С.Ханны [1] о том, что долгосрочные модели атмосферной диффузии дают результаты с погрешностью не более 20%. Таким образом, упрощенная модель [9] может быть применима для быстрых оценочных расчетов, поскольку вычисление интегралов с погрешностью не более 2-3% в полной формуле (3) занимает на порядок больше времени.

Оценка влияния изменчивости метеопараметров

Как правило, при нормативных расчетах среднегодовых концентраций [11] и базирующихся на них хронических и канцерогенных рисков для здоровья населения [13] используются климатические повторяемости $p_1(\phi)$, $p_2(u)$ и $p_3(\lambda)$ метеорологических параметров. Они могут быть запрошены для

территории расположения города или промышленного предприятия в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Однако, при сопоставлении с натурными наблюдениями (например, с данными снеговых проб) представляется интересным знать распределения метеопараметров для конкретного года или сезона. С целью определения влияния изменчивости метеопараметров от года к году мы обработали данные стандартных метеорологических наблюдений для района г. Белово за три года (данные взяты с сайта www.gr5.ru).

Влияние реальной для данной территории изменчивости распределения $p_3(\lambda)$, климатический вид которого рассчитывается в ГГО им. А.И. Воейкова, оценить пока не представляется возможным, поскольку данные теплосбалансовых станций отсутствуют (как и сами станции), а метод расчетной оценки [7] предполагает знание температуры почвы, которая не приводится в составе стандартных 8-и срочных наблюдений. Построение конкретных распределений $p_3(\lambda)$ было бы возможным, например, в случае приобретения ультразвукового метеорологического комплекса АМК-03, разработанной в ИМКЭС СОРАН и позволяющей определять характеристики турбулентности, в том числе и K_1 .

Изменчивость распределения скорости ветра $p_2(u)$ и ее влияние на расчет средних концентраций при круговой розе ветров показаны на рис. 2. Из трех обработанных зимних сезонов оставлены только два с максимальными отклонениями, поскольку распределение $p_2(u)$ для зимы 2010-2011 гг. практически полностью повторяет таковое за зиму 2009-2010 гг.

Несмотря на то, что зима 2009-2010 гг. отличалась заметно большей повторяемостью слабых скоростей ветра, влияние данных отличий на результат расчета среднегодовой концентрации от неорганизованного пылящего источника (отвал) составляет порядка 10% в районе максимума концентрации (250 м от центра источника) и далее слабо затухает.

На рис. 3 показаны изменения от года к году повторяемости направлений ветра (розы ветров) за зимние периоды трех последних лет. Получена оценка влияния соответствующих сглаженных функций $p_1(\phi)$ на расчетные значения сухого осаждения пыли от неорганизованного площадного источника в западном и северном направлениях. При этом во всех трех расчетах использован единый дисперсный состав m_{i1} суммарного выброса, приведенный в таблице 1 в 4-й строке (Распределение 1). Нетрудно заметить, что влияние естественной изменчивости повторяемости направлений ветра только за 3 года может привести к различию в результатах суммарного осаждения пыли почти в 2 раза.

Параметры выброса промышленных источников, содержащиеся в базах данных для нормативных расчетов, в большинстве случаев получаются с привлечением расчетных методов, официально рекомендованных в РФ для тех или иных типов производственных процессов. Рассчитанные параметры контролируются природоохранными властями на этапе утверждения проектов. В результате можно считать, что данные инвентаризации выбросов являются подобными для одинаковых типов производств. И если величина выброса какого-то источника содержит погрешность, то она с большой долей вероятности характерна и для остальных аналогичных источников тех же производств. Таким образом, в силу линейности формул (1) и (3) погрешности определения мощностей выброса промышленных источников приводят в рамках данной модели к систематической ошибке при расчете средней концентрации q_i .

Однако нормативные базы данных не содержат в настоящее время информации о распределении m_i частиц по размерам в суммарных пылевых выбросах M . На рисунке 4 показаны результаты модельных расчетов, полученные для фракционного состава выброса с тремя вариантами m_i , $i=1, \dots, 5$, представленными в таблице. Распределение 1 (m_{i1}) и скорости осаждения V_i для действующего отвала (работа техники и сдувание) взяты из [14], где был проведен литературный обзор немногочисленных экспериментальных исследований дисперсного состава выбросов предприятий угледобычи (в основном для Донецкого бассейна). Однако достаточно очевидно, что фракционный состав существенно зависит от различных факторов (марка угля, прочность породы, интенсивность обработки). Для имитации погрешности в задании дисперсного состава предположим, что количество крупных частиц несколько увеличилось (за период осреднения поверхность отвала интенсивно обрабатывалась – распределение 2). В распределении 3, напротив, преобладают мелкие частицы, что возможно в случае, когда основной механизм образования частиц есть ветровое сдувание. При этом суммарный выброс M предполагается неизменным.

На рис. 4 (слева) можно видеть изолинии расчетного суммарного сухого осаждения пыли (P_c , формула (2)) в окрестности ранее описанного неорганизованного площадного источника с распределением 1. При этом средние концентрации q_i рассчитаны для метеоусловий зимы 2008-2009 гг. В правой части рисунка показано влияние изменения распределения выброса по размерам частиц m_i при неизменности других данных по линии на север от центра источника. Нетрудно заметить, что результаты меняются почти в 3 раза.

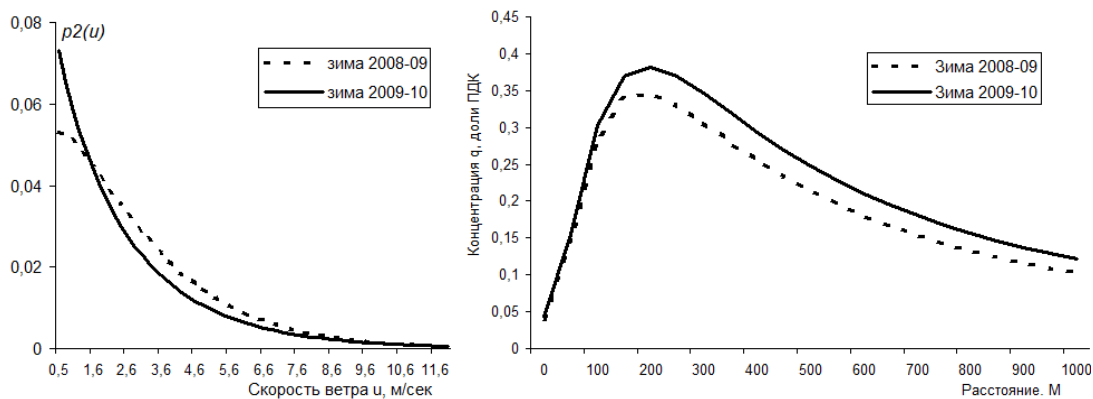


Рис. 2. Естественные изменения распределения скорости ветра (слева) и их влияние на результаты расчета среднегодовой концентрации от площадного источника при круговой розе ветров (справа).

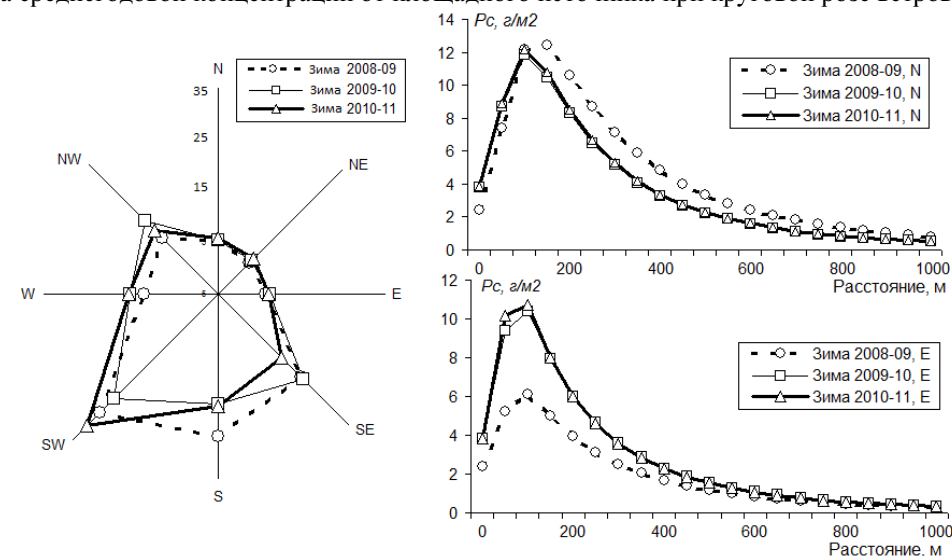


Рис. 3. Изменчивость зимней розы ветров г. Белово и ее влияние на расчет выпадения пылевых частиц в северном (N) и западном (E) направлениях от неорганизованного площадного источника.

Таблица. Три варианта дисперсного состава выброса пылящего источника.

Номер фракции, i	1	2	3	4	5
Размер частиц, μm	<1	1-10	10-50	50-100	>100
Скорость осаждения, V_i , м/с	0.001	0.007	0.04	0.15	0.5
Распределение 1, $100 m_{i1}, \%$	20	47	22	8	3
Распределение 2, $100 m_{i2}, \%$	15	40	30	10	5
Распределение 3, $100 m_{i3}, \%$	50	30	18	2	1

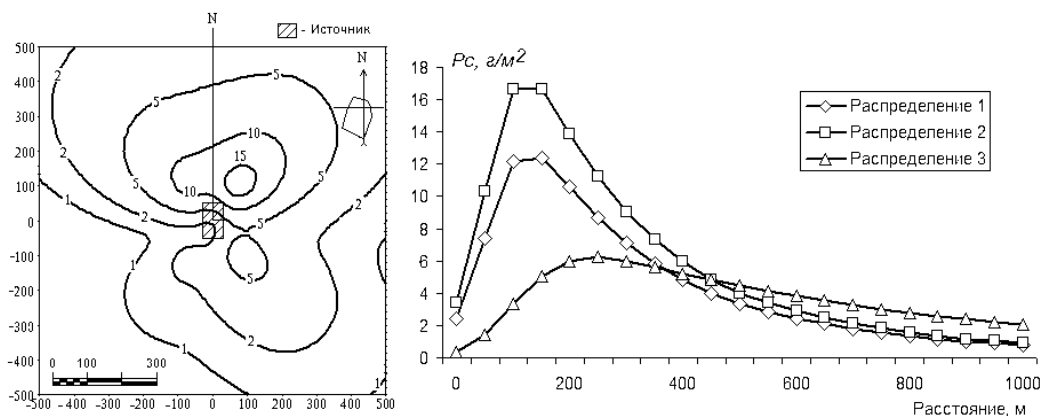


Рис. 4. Изолинии расчетного сухого осаждения P_c ($г/м^2$) за зимний период 2008-2009 гг в окрестности площадного источника (слева) и влияние дисперсного состава выброса с распределениями из таблицы на результаты расчетов по линии на север (N) от центра источника (справа).

Проведенные выше расчеты показывают, что для получения достаточно надежных модельных оценок осаждения пылевых частиц в окрестности объектов угледобывающей промышленности необходимо весьма аккуратно подходить к подготовке входные данные.

Изменение повторяемости скоростей ветра достаточно слабо влияет на результаты моделирования.

Для оценки максимально возможного осаждения необходимо выбирать наиболее неблагоприятную розу ветров, причем для каждого направления ветра.

Наибольшее влияние на результаты моделирования оказывает задание дисперсного состава суммарного выброса, для определения которого необходимы экспериментальные исследования. В частности, для неорганизованных источников представляется перспективным восстановление дисперсного состава по данным снегового анализа и краткосрочных замеров осаждения пыли вдоль линии ветра.

Литература

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под. ред. Ф.Т.М. Ньистадта, Х.-Л. Ван-Допа // Гидрометеоздат, 1985. 350 с.
2. Быков А.А., Безруков П.А., Попенко К.Ю., Мокроусов В.В. Программный комплекс “ЭРА” // Экология производства. 2007. № 9. С. 80-83.
3. Быков А.А., Счастливцев Е.Л., Пушкин С.Г., Климович М.Ю. Разработка и апробация локальной модели выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения из атмосферы на подстилающую поверхность // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10, № 5. С. 563-573.
4. Быков А.А., Счастливцев Е.Л., Пушкин С.Г., Смирнова О.В. Моделирование загрязнения почвы атмосферными выбросами от промышленных объектов угледобывающего региона // Ползуновский вест. 2006. № 2. С. 209-217.
5. Быков А.А., Счастливцев Е.Л., Пушкин С.Г. Особенности построения и практического применения локальной модели загрязнений почвы техногенными выбросами пылевых частиц // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2007. № 4. С. 74-82.
6. Газиев Я.И., Соснова А.К. Физико-математическое моделирование процесса аэриального загрязнения почв промышленными дымовыми выбросами в атмосферу и продуктами их физико-химических превращений // Тр. ИЭМ. 1987. Вып. 14(129). С. 3-15.
7. Генихович Е.Л., Осипова Г.И. Определение коэффициента турбулентности по данным стандартных метеорологических наблюдений. С-Пб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 1984. Вып. 479. С. 62-69.
8. Генихович Е.Л., Берлянд М.Е., Грачева И.Г. и др. Оперативная модель расчета концентраций, осредненных за длительный период. С-Пб.: ГГО им. А.И. Воейкова. Вып. 549. С. 11-31.
9. Методика экологической экспертизы предпроектных и проектных материалов по охране атмосферного воздуха. Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ. Москва, 1995.
10. Методическое пособие по расчету, нормированию и контролю выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. СПб.: НИИ Атмосфера, 2005. 211 с.
11. Методика расчета осредненных за длительный период концентраций выбрасываемых в атмосферу вредных веществ (дополнение к ОНД-86). С-Пб.: ГГО им. А.И. Воейкова, 2005.
12. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 92 с.
13. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду 2.1.10.1920-04. М., 1994. 163 с.
14. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 с изменением № 1. СанПиН 2.2.1./2.2.1-2362-08 От 10 апреля 2008 г. № 25. “Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов”. М., 2008.

Разрывы в свойствах массивов данных как признаки границ в уникальных структурах

А.Б. Логов

Институт вычислительных технологий СО РАН (кемеровский филиал), Кемерово

Обоснование анализа неоднородных уникальных структур дано в материалах предшествующей конференции [1]. Тип данных определяет один из наиболее контрастных вариантов постановки задачи.

Вариант 1. Систему из $i = \overline{1, A}$ элементов образует j -ое косвенное измерение $R(i/j)$. Совокупность измерений $j = \overline{1, B}$ различается физической природой и, безусловно, размерностью. Уникальность объекта не позволяет найти априорное правило комбинирования функциональной характеристики типа $\alpha 1 \cdot R(i/j=1)^{\beta 1} \pm \alpha 2 \cdot R(i/j=2)^{\beta 2} \pm \dots$. Ранее обосновано [2] применение для этого моделей, вытекающих из определения информационной энтропии.

Для конкретности будем рассматривать пример совокупности $B = 6$ геофизических измерений по глубине каротажной скважины. Целью анализа становится выявление сложной структуры массива пород и границ между слоями. Выбор наиболее информативных или достоверных комбинаций осуществляется на основе изучения инвертированных моделей данных, схема получения которых кратко иллюстрируется на рисунке 1. Инвертированные модели могут образовать системы из $j = \overline{1, B}$ показателей (измерений + комбинаций) для каждого элемента. Соответственно, таблица $U(j/i)$ группируется по строкам (выделено!).

Изменение роли показателя (вплоть до изменения знака $U(j/i)$) при переходе между соседними элементами является признаком обнаруженной в этом месте границы.

Исходные данные																																																																										
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>...</td> <td>j</td> <td>...</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>i</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">$R(i/j)$</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			1	...	j	...	B	1						...						i		$R(i/j)$...						A																																										
	1	...	j	...	B																																																																					
1																																																																										
...																																																																										
i		$R(i/j)$																																																																								
...																																																																										
A																																																																										
$\hat{M}[\ln R(i/j)] = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A \ln R(i/j)$ $\sigma[\ln R(i/j)] =$ $\rightarrow = \left\ \frac{1}{A-1} \sum_{i=1}^A \{ \ln R(i/j) - \hat{M}[\ln R(i/j)] \}^2 \right\ ^{1/2}$																																																																										
Модели – прямые		– инвертированные																																																																								
$U(i/j) = \frac{\ln R(i/j) - \hat{M}[\ln R(i/j)]}{\sigma[\ln R(i/j)]}$ <table border="1"> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>...</td> <td>j</td> <td>...</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>i</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">$U(i/j)$</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		1	...	j	...	B	1						...						i		$U(i/j)$...						A						$\hat{M}[U(i/j)] = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B U(i/j)$ \downarrow $\sigma[U(i/j)] = \left\ \frac{1}{B-1} \sum_{j=1}^B \{ U(i/j) - \hat{M}[U(i/j)] \}^2 \right\ ^{1/2}$	$U(j/i) = \frac{U(i/j) - \hat{M}[U(i/j)]}{\sigma[U(i/j)]}$ <table border="1"> <tr> <td></td> <td>1</td> <td>...</td> <td>j</td> <td>...</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>i</td> <td></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">$U(j/i)$</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>A</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		1	...	j	...	B	1						...						i		$U(j/i)$...						A					
	1	...	j	...	B																																																																					
1																																																																										
...																																																																										
i		$U(i/j)$																																																																								
...																																																																										
A																																																																										
	1	...	j	...	B																																																																					
1																																																																										
...																																																																										
i		$U(j/i)$																																																																								
...																																																																										
A																																																																										

Рис. 1. Схема преобразования данных к инвертированным моделям.

Суммирование прямых моделей $U(i/j)$ показателей, инвертированные модели которых распределены подобным образом, приводит к получению более достоверных заключений, уменьшающих вероятность признания ложных границ. Вычитание моделей с противоположными факторами снижает вероятность пропуска цели.

В рассматриваемом примере получено 14 комбинированных показателей, причем рис. 2 позволяет убедиться, что практически все они являются работоспособными (радикально меняют место на границе).

Основную ценность имеют аномально сильные диагностические признаки, например:

- комбинация № 7 $U(i/j=1) - U(i/j=2)$;
- и противоположная комбинация № 16 $U(i/j=5) - U(i/j=4) + [U(i/j=2) - U(i/j=1)]$.

Вариант 2. При анализе "карты" предполагается, что измерения показателей различной размерности $R(k)$ при $k = \overline{1, C}$ обобщены $\sum_{k=1}^C U_k(i/j)$, что обеспечивает повышенную достоверность модели объекта (рис. 3).

Системы $j = \overline{1, B=16}$ создает "сканирование" модели по столбцам. Пример полезно проиллюстрировать фрагментом таблицы из двух соседних, центральных столбцов, один из которых имеет наибольший средний квадратичный разброс $\sigma \approx 0.4448$, а другой – наибольшее среднее значение $\hat{M} \approx 2.0242$.

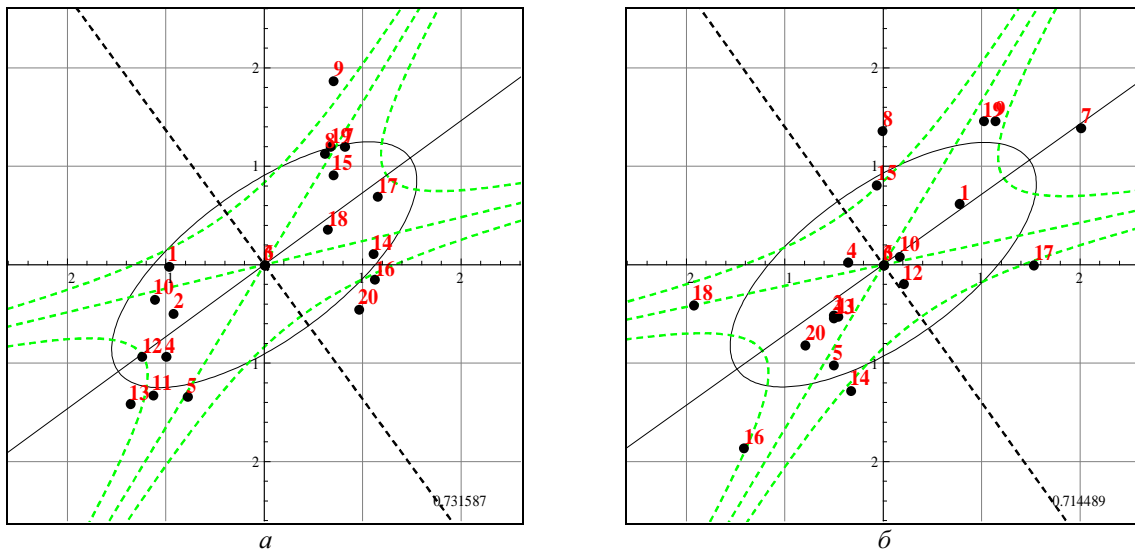


Рис. 2. Разрывы комбинированных свойств на границе при $i = 34$ и $i = 35$.

Таблица 1. Фрагмент модели объекта.

	...	7	8	...
1		-1.8363	-0.2510	
2		0.0688	-0.2510	
3		0.3690	0.1771	
4		0.6339	0.5547	
5		0.6339	0.8925	
6		0.8708	0.8925	
7		0.8708	0.8925	
8	...	0.6339	0.8925	...
9		0.6339	0.5547	
10		0.6339	0.1771	
11		0.3690	0.1771	
12		0.0688	-0.2510	
13		-0.2778	-0.7452	
14		-1.8363	-0.7452	
15		-1.8363	-2.9673	
MO	...	1.9153	2.0242	...
СКР	...	0.4448	0.3119	...

Можно отметить большое отличие соседних моделей в строке $i = 1$, но не менее важно изменение знака и, следовательно, свойств в строке $i = 12$.

Из результатов инвертирования нас интересуют оценки разрывов свойств между системами, которые по принятой рабочей гипотезе отождествляются с концентрацией опасных мест в массиве. Результат также иллюстрируется фрагментами с наибольшим ($\sigma(1) \approx 0.9383$) и наименьшим ($\sigma(12) \approx 0.3566$) разбросом.

Выделив $i = 1, A = 15$ систем по строкам модели, получим с помощью инвертирования оценки разрывов между строками. Совмещение результатов на упомянутом рис. 3 дает места и вероятности возникновения нарушений в массиве.

Таблица 2. Фрагмент инвертированной модели объекта.

...	2-3	3-4	...	7-8	8-9	...	11-12	12-13	...	14-15
1		-3.8529		+1.6845	-2.14665		+0.8817	-0.4509		+1.3002
...										
2	-3.1323	+1.2905		-0.8968			+1.3470			-2.5687
...										

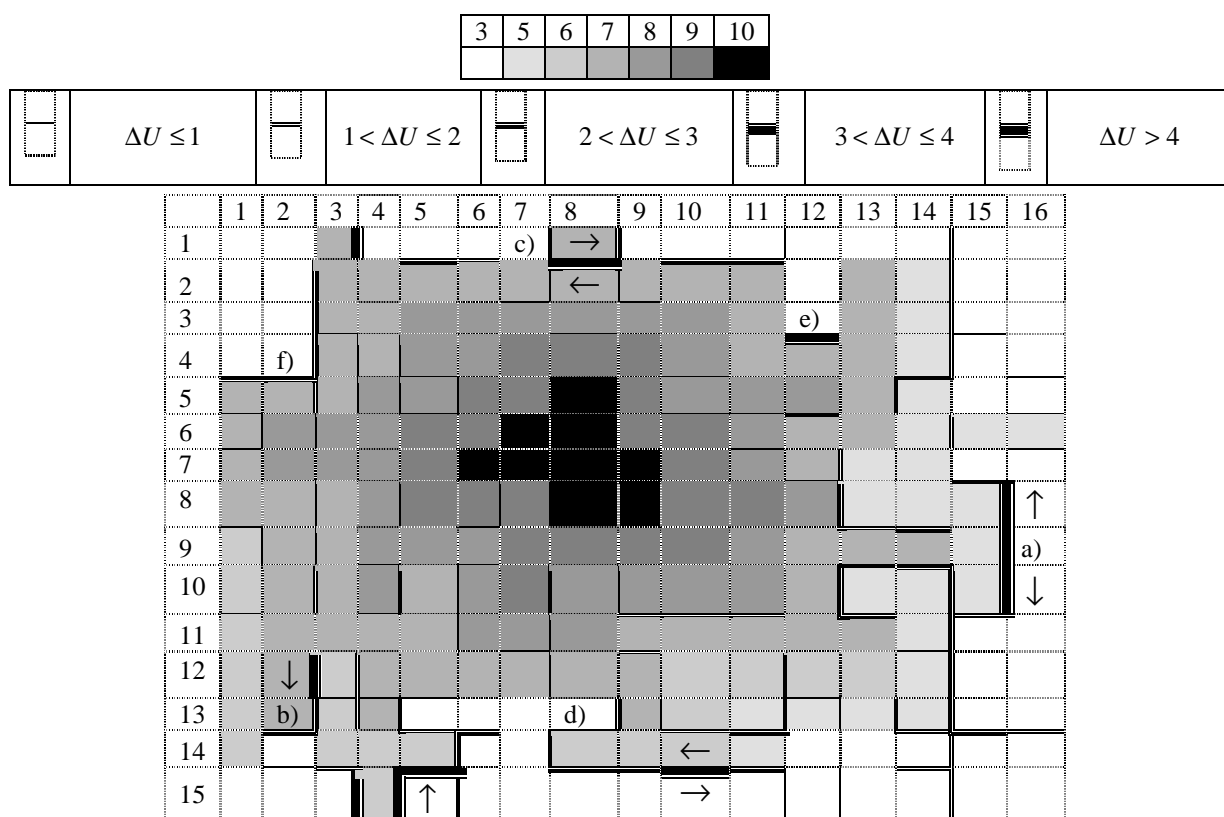


Рис. 3. Оценки "разрывов" в сплошной среде по измерениям полей.

Отличительной особенностью метода является отсутствие какого-либо сглаживания измеренных показателей, вследствие чего опасные места локализованы в концентраторах полей.

Литература

1. Логов А.Б., Замаев Р.Ю., Логов А.А. Принципы мониторинга уникальных объектов. Часть 1. Критерии и границы на фазовой плоскости // Сб. тр. VIII Всероссийской конф. «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф (TV-2009)». 2009. С. 204-208.

Логико-вероятностное моделирование динамики заболеваемости клещевым энцефалитом в зависимости от природных факторов

В.Б. Бериков¹, И.А. Пестунов², О.В. Морозова³, В.Н. Бахвалова⁴, Г.Л. Полякова¹, В.В. Панов⁴

¹ Институт математики им. С.Л. Соболева, Новосибирск

² Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

³ Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН, Новосибирск

⁴ Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск

Введение

Клещевой энцефалит (КЭ) - опасная природно-очаговая инфекция человека, возбудителем которой является вирус клещевого энцефалита (ВКЭ). Попадая в организм человека при укусах половозрелых иксодовых клещей или при употреблении сырого молока, ВКЭ вызывает тяжелые заболевания, нередко с неврологическими, инвалидизирующими или смертельными последствиями.

В природных очагах ВКЭ циркулирует в составе паразитарной системы КЭ (ПС КЭ), включающей вирус, его членистоногих хозяев (клещей-переносчиков) и позвоночных хозяев (прокормителей клещей). Для ПС КЭ, входящей в состав лесных экосистем южной части лесной зоны Евразии от Атлантического до Тихого океанов и функционирующей в широком диапазоне природных условий, исследователи отмечают многообразие и сложность биоценологических связей между ее компонентами, сопряженную цикличную изменчивость популяций возбудителя и его хозяев, отражающуюся в периодических изменениях заболеваемости людей КЭ [1, 10- 17]. Временные изменения популяций элементов ПС КЭ в значительной мере зависят от абиотических факторов зонального и регионального масштабов: теплообеспеченности, влажности воздуха и почвы, количества осадков, различных видов солнечной радиации, и др. Комплексный анализ связей между заболеваемостью людей КЭ, многолетней динамикой элементов ПС КЭ, динамикой климатических и астрофизических факторов необходим для выявления закономерных зависимостей и надежных прогностических параметров.

Анализ временных рядов заболеваемости людей КЭ с оценкой возможности использования параметров паразитарной системы и метеорологических данных для прогнозирования эпидемической опасности природных очагов проводился и ранее многими исследователями, в частности [1-4, 12,15]. В существующих работах проводится, как правило, анализ рядов данных, относящихся к одной территории. Однако кроме индивидуальных особенностей, существуют и общие для территориально разобщенных эндемичных областей закономерности, выявление которых возможно при совместном анализе данных в разных регионах.

В настоящее время большую актуальность имеют задачи анализа и прогнозирования динамически меняющихся характеристик множества объектов, имеющих различную пространственную или временную локализацию. В литературе такого рода задачи известны как задачи обработки панельных данных [5,6] или задачи анализа ансамбля многомерных временных рядов [7]. Для решения этих задач существуют методы, основанные на применении различных видов моделей панельных данных и сведении исходной задачи к задаче оценивания параметров регрессионной модели. Модели позволяют агрегировать данные по всем объектам и получать надежные решения даже в случае, когда по каждому из объектов объем наблюдений сравнительно невелик.

Для обоснования полученных решений применяются различные предположения о вероятностном распределении исследуемых характеристик (как правило, о его нормальности). Выбор оптимальной сложности регрессионной модели (обеспечивающей разумный компромисс между ее сложностью и точностью на обучающей выборке ограниченного объема) в общем случае является пока нерешенной проблемой.

В предлагаемой работе решается задача построения моделей временных рядов при условии, что длина рядов является малой (сравнимой с числом используемых характеристик). В этом случае проверка гипотез о согласии постулируемого распределения с имеющимися данными является затруднительной. Кроме того, предполагается, что интервалы наблюдений за различными объектами могут не полностью совпадать, что осложняет применение трендовых моделей. Наконец, считается, что объекты могут описываться как количественными, так и качественными характеристиками. В этом случае применение традиционных подходов [5] (введение *dummy*-переменных, рассмотрение пробит-, логит-моделей и т.п.), особенно в случае большого числа значений качественных переменных, становится затруднительным.

В работе используется класс логических решающих функций (ЛРФ, решающих деревьев) распознавания динамических объектов по предыстории [8]. Применение данного класса функций позволяет получить хорошо интерпретируемую логическую модель, характеризующую общие закономерности поведения анализируемых объектов; дает возможность рассматривать разнотипные переменные, т.е., когда среди исходного набора имеются как количественные, так и качественные характеристики. Данный подход сочетает и другие особенности, присущие классу ЛРФ: отсутствие предположений о параметрической модели распределения; автоматическое выделение наиболее

информативных переменных; прогнозирование целевого показателя по подмножеству наиболее информативных для каждого рассматриваемого случая характеристик, что повышает надежность решения.

Для построения решения применяется коллективный (ансамблевый) подход, основанный на том, что для повышения надежности прогнозирования можно привлекать не одну, а несколько решающих функций. Эти решающие функции могут быть получены различными методами (или одним методом, но с использованием различных параметров), по разным выборкам наблюдений, а также по различным подсистемам переменных. Такое рассмотрение задачи с разных «точек зрения», как правило, приводит к улучшению качества прогнозирования и к лучшему пониманию закономерностей исследуемого явления.

Статья имеет следующую структуру. В первом разделе дается математическая постановка задачи. Во втором разделе описывается метод построения ЛРФ для прогнозирования характеристик динамического объекта. В третьем разделе приводится алгоритм построения коллективного решения на основе различных вариантов ЛРФ. В четвертом разделе приводятся результаты применения разработанного метода для анализа влияния природных факторов на характеристики паразитарной системы клещевого энцефалита по нескольким эндемичным территориям Российской Федерации.

1. Постановка задачи

Предположим, имеется набор объектов исследования $A = \{a_1, \dots, a_N\}$. Для описания свойств объектов используется общий набор характеристик (переменных) $X_1(t), \dots, X_n(t)$, случайным образом меняющихся во времени. Пусть D_j есть область определения характеристики X_j , $j = 1, \dots, n$. Характеристики могут быть как количественными, так и качественными. Для количественной характеристики X_j область ее определения является интервалом числовой оси: $D_j \subset R$. Для качественной характеристики $D_j = \{u_{j,1}, \dots, u_{j,k}\}$ есть множество некоторых значений (имен). Качественные характеристики будем разделять на порядковые (т.е. на множестве ее значений задан некоторый порядок), номинальные (множество значений характеристики неупорядочено) и булевы. Обозначим $D = D_1 \times \dots \times D_n$.

Пусть переменные измеряются в последовательные моменты времени $t_1, \dots, t_m, \dots, t_M$. Для определенности, будем предполагать, что измерения проводятся через равные интервалы. Для каждого объекта a_i существует начальный и конечный моменты измерений $t_{m_i}, t_{M_i} \in \{t_1, \dots, t_M\}$. Таким образом, имеем набор из N многомерных разнотипных временных рядов размерности n и различной длины $T_i = M_i - m_i + 1$, $i = 1, \dots, N$. Значение характеристики X_j для объекта a_i в момент времени t_m обозначим через $x_{i,j}(t_m)$, $m = m_i, \dots, M_i$, $i = 1, \dots, N$, $j = 1, \dots, n$. Через $x_i(t_m)$ обозначим вектор $(x_{i,1}(t_m), \dots, x_{i,n}(t_m))$.

Пусть дополнительно определена общая для всех объектов прогнозируемая случайная характеристика Y . В зависимости от типа характеристики Y будем рассматривать различные типы задач прогнозирования.

1. Y – номинальная характеристика: $Y \in D_Y = \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$, где K – число классов (образов). Задачу данного типа, по аналогии с обычной задачей распознавания образов, назовем задачей распознавания по набору многомерных временных рядов.
2. Y – количественная характеристика. В этом случае имеем задачу прогнозирования количественной характеристики по набору многомерных временных рядов (задачу регрессионного анализа).

Рассмотрим произвольный момент времени t_m , а также набор предыдущих моментов времени $t_{m-1}, t_{m-2}, \dots, t_{m-L}$, где $L < \max(m_1, \dots, m_N)$ – некоторая заданная величина (лаг или «глубина предыстории»), $1 \leq L \ll M$. Для произвольного объекта a_i , $i = 1, \dots, N$ и момента времени t_m , $m = m_i + L, \dots, M_i$, сформируем таблицу предысторий $v_{i,m} = (x_{i,j}(t_{m-1}), \dots, x_{i,j}(t_{m-L}))$, $j = 1, \dots, n$, состоящую из наблюдаемых значений характеристик за L предшествующих моментов времени (размерность таблицы – L строк и n столбцов).

Обозначим через $Y_{i,m}$ случайную величину – возможное значение переменной Y для объекта a_i в момент времени t_m . Предполагается, что $Y_{i,m}$ зависит от поведения объекта в прошлом. Будем полагать, что условное распределение $Y_{i,m}$ при условии, что заданы все предыдущие значения $X_1(t), \dots, X_n(t)$ для объекта a_i , зависит только от значений этих рядов в L предыдущих моментах времени (от таблицы предысторий $v_{i,m}$). Кроме того, предположим, что эта зависимость одна и та же для всех возможных значений m . Данное предположение означает, что статистические свойства рядов, определяющие зависимость, неизменны во времени. В дальнейшем, имея в виду это свойство, будем пропускать индекс, соответствующий моменту времени t_m .

Будем обозначать характеристики, с учетом предыстории, как $X_j^{(l)}$; что означает «характеристика X_j в l -й предыдущий момент времени относительно текущего момента». Пусть $x_j^{(l)}$ - значение переменной X_j в l -й предыдущий момент. Обозначим через $v = (x_j^{(1)}, \dots, x_j^{(L)})$, $j = 1, \dots, n$, таблицу предысторий относительно текущего момента.

Пусть Y – качественная характеристика. Рассмотрим решающую функцию f , которая произвольной таблице предысторий $v \in D^L$ для объекта a_i сопоставляет решение – прогнозируемый класс $\hat{w} = f(v, i)$. Для этой решающей функции можно определить критерий качества как риск неправильного распознавания (вероятность ошибки) $Q_f = P(Y_i \neq f(v, i))$.

Пусть Y – количественная характеристика, f - некоторая решающая функция, по которой строится решение - прогноз для объекта a_i : $\hat{Y} = f(v, i)$. Критерий качества (функцию риска) в данном случае можно определить как математическое ожидание квадрата ошибки: $Q_f = E(Y_i - f(v, i))^2$.

Для вычисления критерия качества решающей функции необходимо знать вероятностное распределение характеристик. Однако это распределение, как правило, неизвестно. Поэтому будем использовать эмпирический критерий - найденную по наблюдениям частотную оценку вероятности ошибки или выборочную дисперсию.

Пусть задан некоторый класс Φ решающих функций. Требуется выбрать из указанного класса функцию, оптимальную по заданному критерию, т.е. построить общую для всех объектов модель зависимости характеристики Y от таблицы предысторий. Модель должна позволять получать прогнозируемое значение \hat{Y} характеристики Y в будущий момент времени по значениям остальных характеристик за L прошлых моментов. Примером аналогичной модели, используемой при эконометрическом анализе панельных данных, является линейная модель с распределенным лагом и фиксированными индивидуальными эффектами [5].

Заметим, что для каждого объекта, в принципе, можно строить индивидуальную модель зависимости. Однако при этом не учитываются общие закономерности, которые, как предполагается, характерны для всех изучаемых объектов.

В данной работе в качестве класса решающих функций будем рассматривать класс логических решающих функций от разнотипных переменных (класс деревьев решений, называемых также деревьями регрессии в случае задачи регрессионного анализа; см., например, [8]). В этом случае функция f представляется в виде некоторого дерева решений. Это дерево имеет такую особенность, что в его вершинах проверяются высказывания относительно некоторых переменных X_j в определенный l -й отсчет времени назад (относительно текущего момента). Цепочка проверяемых высказываний ведет из корня дерева в терминальную вершину, которой приписано прогнозируемое значение Y . Будем называть указанный класс классом деревьев решений для прогнозирования по предыстории.

2. Метод построения логической решающей функции

Для любого заданного дерева решений f для прогнозирования по предыстории можно оценить его качество следующим образом. Обозначим через $\hat{y}_{i,m}$ прогнозируемое значение Y для объекта a_i и момента времени t_m , тогда зададим критерий качества как эмпирический риск

$$\hat{Q}_f = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^N \sum_{m=m_i+L}^M h(y_{i,m}, \hat{y}_{i,m}), \quad \text{где } h(y_{i,m}, \hat{y}_{i,m}) = \begin{cases} 0, & \text{если } y_{i,m} = \hat{y}_{i,m} \\ 1, & \text{иначе} \end{cases} \quad - \text{ для задачи распознавания}$$

динамического объекта; $h(y_{i,m}, \hat{y}_{i,m}) = (y_{i,m} - \hat{y}_{i,m})^2$ - для задачи прогнозирования количественной характеристики, $W = \sum_{i=1}^N T_i - N L$ есть количество суммируемых величин, $i = 1, \dots, N$, $m = m_i + L, \dots, M_i$.

Величина \hat{Q}_f есть частота несовпадений прогноза и реального значения Y (для задачи распознавания), либо средняя квадратическая погрешность прогноза (для задачи регрессионного анализа). Лучшему варианту дерева соответствует меньшее значение критерия.

Сформируем множество всех наблюдаемых таблиц предысторий: $V = \{v_{i,m}\}$, $i = 1, \dots, N$, $m = L + 1, \dots, M$. Исходной информацией для построения дерева решений для прогнозирования по предыстории является набор таблиц $V = \{v_{i,m}\}$, вместе с указанными для каждой таблицы значениями прогнозируемой характеристики $y_{i,m}$, $i = 1, \dots, N$, $m = L + 1, \dots, M$. Будем говорить, что указанные таблицы используются для «обучения» прогнозированию.

Таким образом, возникает задача обработки четырехмерной таблицы данных (объект – переменная – предыстория – время). Однако имеющиеся алгоритмы распознавания или регрессионного анализа с

использованием деревьев решений используют в качестве входной информации двумерные таблицы. Ниже описывается способ представления данных, при использовании которого исходная задача сводится к задаче распознавания образов или регрессионного анализа, в зависимости от типа прогнозируемой характеристики Y .

Для унификации записи введем дополнительную качественную переменную X_{ind} , кодирующую каждый из объектов, и необходимую для учета решающей функцией индивидуальных особенностей объектов. Эта переменная не изменяется с течением времени.

Рассмотрим следующий алгоритм построения ЛРФ для прогнозирования по предыстории.

1. Каждую предысторию $v_{i,m}$, где $i = 1, \dots, N$, $m = m_i + L, \dots, M_i$, «вытянем» в строку $s_{i,m}$, дополненную значением индивидуальной переменной: $s_{i,m} = (x_{i,1}(t_{m-1}), \dots, x_{i,n}(t_{m-1}), \dots, x_{i,1}(t_{m-L}), \dots, x_{i,n}(t_{m-L}), x_{i,ind})$ (длина строки равна $nL + 1$).
2. Из полученных строк сформируем таблицу $B = (s_{1,m_1+L}, \dots, s_{1,M_1}, \dots, s_{N,m_N+L}, \dots, s_{N,M_N})^T$, которой соответствует вектор-столбец, содержащий значения прогнозируемой переменной для каждого из объектов: $z = (z_1, \dots, z_N)^T$, где $z_i = (y_{i,m_i+L}, \dots, y_{i,M_i})^T$, $i = 1, \dots, N$. В результате получаем таблицу данных (B, z) размерности $W \times (n \cdot L + 2)$.
3. Для двумерной таблицы (B, z) с помощью произвольного алгоритма построения дерева решений сформируем ЛРФ.

В настоящей работе применялся рекурсивный R-алгоритм построения дерева решений [8], основанный на динамическом программировании и позволяющий находить сложные закономерности путем увеличения глубины перебора сочетаний переменных. В этом алгоритме используется модифицированный критерий качества $Q'_f = Q_f + \alpha \frac{K}{W}$, где K - число терминальных вершин дерева, α - параметр регуляризации, призванный снизить эффект «переобучения». Детальное описание алгоритма см. в [8].

Известно, что эмпирический риск может сильно отличаться от «истинного» неизвестного риска. Поэтому для более точного оценивания качества предпочтительно использовать оценку риска, найденную по контрольной выборке наблюдений.

Пусть для каждого объекта a_i , $i = 1, \dots, N$, имеются ряды наблюдений $X_1(t), \dots, X_n(t), Y(t)$ в моменты времени t_m , $m = M_i + 1, \dots, M_i + T_i^c$. Будем говорить, что данные ряды используются для контроля качества прогнозирования. Аналогично тому, как это делалось в вышеописанном алгоритме, по соответствующим предысториям длины L сформируем контрольную таблицу данных (B^c, z^c) . Тогда можно сравнить полученные с использованием построенного дерева, прогнозируемые по таблице значения $\hat{y}_{i,m}$, с наблюдаемыми значениями $y_{i,m}$ и определить оценку риска по контрольным рядам:

$$Q_f^c = \frac{1}{W_c} \sum_{i=1}^N \sum_{m=M_i+L}^{M_i+T_i^c} h(y_{i,m}, \hat{y}_{i,m}), \text{ где } W = \sum_{i=1}^N T_i^c - N \cdot L.$$

Заметим, что контрольную таблицу можно формировать не только по контрольным рядам, но и путем случайного отбора некоторых строк таблицы (B, z) . Эти строки не используются при построении дерева решений, а участвуют только на этапе контроля. Аналогичным образом для оценивания качества построенных решающих функций можно применять методы скользящего экзамена и кросс-валидацию.

3. Построение ансамбля деревьев решений

Пусть имеется набор деревьев решений для прогнозирования по предыстории. Рассмотрим произвольную таблицу предысторий v . Каждое дерево дает свой прогноз для v . Общее («коллективное») решение можно определить с помощью метода «голосования» (задача распознавания) или «усреднения» (задача регрессионного анализа). При использовании метода голосования наблюдению приписывается тот класс, которому отдает предпочтение большинство деревьев из набора. В случае задачи регрессионного анализа, прогнозируемое значение получается усреднением прогнозов по всем деревьям регрессии. Кроме простого усреднения или голосования с равными вкладами каждого «голосующего», более целесообразно использовать процедуру, в которой учитывается оценка риска, соответствующего каждому дереву: чем меньше риск, тем больший вес имеет соответствующий голос.

Для оценивания качества построенного коллективного решения используются способы, аналогичные тем, которые были описаны в предыдущем разделе. Алгоритм построения ансамбля состоит из нескольких этапов.

1. На первом этапе используются все имеющиеся характеристики. Характеристика, которая соответствует корню построенного дерева, является наиболее информативной, поскольку, во-

первых, именно от нее зависит дальнейшее движение по дереву, а, во-вторых, при ветвлении корневой вершины используется полный набор наблюдений.

2. При построении второго дерева используются все характеристики, кроме отобранной на предыдущем этапе. Это делается с целью получить вариант дерева, наиболее радикально отличающийся от предыдущего.
3. На следующих этапах последовательно исключаются характеристики, соответствующие корневым вершинам уже построенных деревьев. Поскольку исключаются наиболее информативные характеристики, качество деревьев, как правило, может лишь ухудшаться от этапа к этапу.

Алгоритм прекращает работу, как только будет построено заданное число деревьев, либо показатель качества достигнет заданной минимально допустимой величины.

4. Анализ влияния природных факторов на динамику заболеваемости ВКЭ

Для выявления общих закономерностей использовались ряды данных, описывающие динамику заболеваемости и метеорологических наблюдений в г. Новосибирске (1991-2010 гг.), Иркутске (1990-2010 гг.) и Горно-Алтайске (1995-2010 гг.): относительные показатели заболеваемости КЭ (число заболевших на 100 тыс. населения); среднемесячная температура воздуха; среднемесячная относительная влажность воздуха; среднемесячное количество осадков (начиная с октября прошлого года по сентябрь текущего). Кроме того, использовались данные об активности Солнца: среднегодовые показатели индекса пятнообразования (числа Вольфа) за указанные годы. Из-за сложности задачи использовалось «огрубление» информации: интервал изменения заболеваемости был разделен на 3 диапазона: до 10 чел/100 тыс. (низкая заболеваемость); от 10 до 20 чел/100 тыс. (средняя); выше 20 чел/100 тыс. (высокая). Таким образом, решается задача распознавания по набору динамических объектов. Значения ряда заболеваемости для каждого из городов за последние два года использовались как контрольные.

В результате применения разработанного алгоритма анализа был построен ансамбль деревьев решений для прогнозирования по предыстории, для которого ошибка на контроле составила 0.167, т.е. одно значение ряда из шести было предсказано неверно. Было проведено сравнение с существующим бустинг-алгоритмом построения ансамбля деревьев решений [9], для которого исходные панельные данные были преобразованы в таблицу в соответствии с алгоритмом, описанным в разделе 2. Для построенного ансамбля ошибка составила 0.33 (два значения из шести были предсказаны неправильно). Таким образом, предложенный алгоритм оказался более точным на контрольных данных.

Были рассмотрены и другие постановки задач. Например, требовалось найти закономерности, определяющие качественное поведение показателя заболеваемости (уменьшение или увеличение по сравнению с предыдущим уровнем) в зависимости от метеорологических факторов. Приведем найденную закономерность: «Если средняя температура воздуха в апреле больше 3.8°C, то в текущем году заболеваемость повышается; в противном случае - уменьшается». Данная закономерность справедлива для 78% годовых показателей заболеваемости. Ошибка на контрольных данных составила 0.167.

При анализе также была рассмотрена гипотеза о том, что после 2000 года произошла трансформация механизма влияния природных факторов на заболеваемость КЭ. Это изменение могло возникнуть как от глобального потепления, так и от дополнительного воздействия антропогенных факторов (урбанизация, изменение социально-экономических условий проживания населения). Приведем список полученных в результате анализа закономерностей:

1. ЕСЛИ (Территория={Новосибирск или Иркутск}) И (Число Вольфа < 107), ТО наблюдается НИЗКИЙ уровень заболеваемости.
2. ЕСЛИ (Территория ={Новосибирск или Иркутск }) И (Число Вольфа \geq 107), ТО наблюдается СРЕДНИЙ уровень заболеваемости.
3. ЕСЛИ (Территория ={Горно-Алтайск}) И (Средняя влажность воздуха в июне < 70%), ТО наблюдается ВЫСОКИЙ уровень заболеваемости.
4. ЕСЛИ (Территория ={Горно-Алтайск}) И (Средняя влажность воздуха в июне \geq 70%), ТО наблюдается СРЕДНИЙ уровень заболеваемости.

Ошибка на обучении для полученного решающего правила составила 0.06, а на скользящем экзамене – 0.16. Интересно, что при аналогичном анализе рядов, соответствующих периоду до 2000 года, ошибка радикально возрастает, что говорит о необходимости дополнительного учета не только природных, но и антропогенных факторов, характеризующих данный период.

Заключение

В работе предложен метод анализа ансамбля многомерных разнотипных временных рядов, основанный на классе логических решающих функций. В отличие от существующих алгоритмов анализа временных рядов, разработанный метод позволяет выделять логические закономерности, описывающие динамику изучаемых объектов, дает возможность анализировать как количественные, так и качественные (порядковые, номинальные, булевы) переменные, не требует предположений о параметрической модели распределения. На основе предложенного метода создан алгоритм построения коллективного решения.

При решении прикладной задачи анализа влияния природных факторов на заболеваемость клещевым энцефалитом в трех эндемичных регионах России, разработанный метод показал более высокую точность прогнозирования на контрольных данных, чем существующий бустинг-алгоритм построения коллектива деревьев решений.

Литература

1. Добротворский А.К., Бахвалова В.Н., Харитонов Н.Н., Сапегина В.Ф. Динамика параметров паразитарной системы клещевого энцефалита в условиях северной лесостепи Приобья // Сиб. экол. журнал. 1994.Т.1, №4. С.369 - 375.
2. Коротков Ю.С., Никитин А.Н., Антонова А.М. Роль климатических факторов в многолетней динамике заболеваемости населения г. Иркутск клещевым энцефалитом // Бюллетень ВСНЦ СО РАМН. 2007, № 3 (55). С.126-130.
3. Лбов Г. С., Полякова Г. Л., Бахвалова В. Н., Морозова О. В. Исследование влияния природных факторов на заболеваемость клещевым энцефалитом // Вестник Новосиб. гос. ун-та. Серия: Биология, клин. Медицина, 2010. № 3. С. 31-37.
4. Полякова Г.Л., Лбов Г.С., Бериков В.Б., Бахвалова В.Н., Щучинова Л.Д., Гладкий П.А., Михеев В.Н., Глухов В.В., Никитин А.Я., Маслов П.П., Морозова О.В. Анализ влияния солнечной активности на заболеваемость клещевым энцефалитом, иксодовым клещевым боррелиозом и клещевым риккетсиозом в эндемичных областях России // Научная конференция «Фундаментальные науки – медицине». Новосибирск, 7-10 сентября 2010 г. Изд-во ИХБФМ СО РАН. 2010. С. 78.
5. Johnston J. and DiNardo, J. Econometric Methods. 4th Ed. McGraw-Hill, 1997.
6. Frees E. W. Longitudinal and Panel Data. Cambridge University Press, 2004.
7. Лбов Г.С., Старцева Н.Г. Логические решающие функции и вопросы статистической устойчивости решений. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. 212 с.
8. Лбов Г.С., Бериков В.Б. Устойчивость решающих функций в задачах распознавания образов и анализа разнотипной информации. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 2005. 218 с.
9. Dieterich T.G. An experimental comparison of three methods for constructing ensembles of decision trees: Bagging, boosting, and randomization // Machine Learning. 2000. Vol. 40, N 2. P. 139-158.
10. Коренберг Э.И., Ковалевский Ю.В. Основные черты эко-эпидемиологии клещевого энцефалита // ISSN 1609-9877. 2004 Vol. 18. P. 133-137.
11. Наумов, Р.Л., Лабзин В.В. Цикличность изменения элементов паразитарной системы очагов клещевого энцефалита // Паразитологический сборник. Л.: Наука. 1984. С. 139-159.
12. Окулова Н.М. Биологические взаимосвязи в лесных экосистемах (на примере природных очагов клещевого энцефалита). М: Наука. 1986. 246 с.
13. Коротков Ю.С., Акулова Л.М., Хазова Т.Г., Килина А.И., Кисленко Г.С., Чунихин С.П. Циклические изменения численности таежного клеща в заповеднике «Столбы» // Мед. паразитология и паразитарные болезни. 1992. № 3. С. 7-10.
14. Коротков Ю.С. Постепенная изменчивость паразитарной системы клещевого энцефалита // Вопросы вирусологии. 2005. №3. С. 52-56.
15. Верета Л.А. Принципы прогнозирования заболеваемости клещевым энцефалитом. М. :Медицина. 1975. 135 с.
16. Бахвалова В.Н., Морозова О.В., Морозов И.В. Свойства популяции вируса клещевого энцефалита, циркулировавшего в 1980-2006 гг. на территории Новосибирской области // Бюллетень СО РАМН. 2007. №4 (126). С. 41-48.
17. Злобин В.И. Эпидемиологическая обстановка и проблемы борьбы с клещевым энцефалитом в Российской Федерации // Бюллетень Сибирской медицины. 2006. № 5 (приложение № 1). С. 16-23.

Ландшафтный рисунок на снимках разного пространственного разрешения

И.Д. Махатков¹, И.А. Пестунов², С.А. Рылов³

¹ Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск

² Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

³ Новосибирский государственный университет

Введение

Приемы и результаты тематической интерпретации космических изображений в значительной степени зависят от пространственного разрешения снимков. В силу особенностей рельефа, литологии, режима увлажнений, эдификаторных свойств доминатов растительности, изменения растительного покрова в пространстве часто носят скачкообразный характер. Растительность при этом представляет собой мозаику фитоценозов, функционально относительно замкнутых однородных сообществ растений со своеобразными характерными режимами питания, увлажнения и т.д., топологически соответствующих биогеоценозу [11] и основной единице ландшафта – ландшафтной фации [10, 4, 9].

При любой детальности изображения часть пикселей космического снимка неизбежно попадает на границы различных фаций, а значения спектральных откликов для них формируется как среднезвешенные. Такие пиксели нельзя соотнести с поверхностью какого-либо конкретного фитоценоза, что затрудняет их тематическую интерпретацию. Чем меньше размеры пикселя, т.е. больше детальность изображения, тем меньше доля таких пограничных пикселей. В то же время увеличение пространственного разрешения приводит к увеличению варьирования значений спектральных откликов, не связанных с характером растительного покрова в целом, например – теней крон. В этой связи при тематической классификации возникает необходимость выбора оптимального разрешения сочетающего минимизацию плохо классифицируемых пограничных пикселей и варьирования откликов не связанных с тематикой классификации.

Понятно, что доля пограничных пикселей зависит не только от их размера, но и морфологии ландшафта, и прежде всего – от размеров ландшафтных фаций, протяженности их линейных границ.

Доклад посвящен анализу соотношений пограничных и гомогенных пикселей при разном пространственном разрешении снимка и в разных ландшафтных условиях с целью определения вариантов оптимального разрешения.

Объект и методика

В качестве объекта исследования был выбран участок Ноябрьского экологического полигона в центральной части Сибирских Увалов (63,351 с.ш., 75,483 в.д.), рельеф, почвы и растительность которого достаточно хорошо изучены [1].

Участок расположен в центральной части Сибирских Увалов, представленных пологоволнистой слегка всхолмленной полосой ледниковых и водно-ледниковых супесчаных и песчаных отложений с относительной высотой холмов и гряд около 5-10 м и шириной от нескольких сотен метров до 2-3 км [3]. Почвы участка в целом ряду усиления гидроморфности представлены песчаными подзолами, подзолами гидроморфными, торфяно-подзолами, болотными олиготрофными и мезотрофными, в долинах рек аллювиальные светло-гумусовые [5, 8]. Растительность исследуемой территории относится к подзоне северной тайги [6, 7].

Из характерных для территории типов ландшафта, урочищ, для анализа были выбраны четыре основных:

- дренируемые, как правило, приподнятые части увалов, с автоморфными лишайниковыми лесами в наиболее сухих местообитаниях и относительно небольшими участками лишайниково-зеленомошных и лишайниково-сфагновых лесов в часто замкнутых депрессиях;
- сниженные облесенные части увалов, преимущественно с сосновыми сфагновыми лесами, небольшими фрагментами лишайниковых и лишайниково-сфагновых лесов на небольших холмах и облесенных сфагновых болот в депрессиях;
- плоскобугристые болотные комплексы с характерными приподнятыми буграми, межбугорными топами и внутриболотной гидросетью;
- грядово-мочажинные болотные комплексы с грядами и мочажинами, вытянутыми поперек направления внутриболотного стока и внутренней гидросетью.

Кроме этих ландшафтов, для территории характерны еще и ландшафты речных долин и заозеренных замкнутых котловин, но на ключевом участке гидросеть представлена сравнительно небольшими реками и ручьями и небольшим количеством котловин, ландшафтный рисунок которых не дает представления о его морфологии в целом.

Элементарные контуры ландшафтных фаций, основной пространственной единицы, выделялись путем контурного дешифрирования на аэрофотоснимке с пространственным разрешением 2 м.

Несмотря на сравнительно хорошую натурную изученность территории, при контурном крупномасштабном дешифрировании положение линейных границ не всегда очевидно. Даже при

натурном обследовании спорным может оказаться выделение и разграничение фитоценозов. При дешифрировании мы не выделяли контуры площадью меньше 20 м² и контуры с неочевидными границами. Иначе говоря, было выделено минимальное количество контуров.

Для общей характеристики морфометрических особенностей использовались индексы дробности (K_1) и расчлененности (K_2) [2]. Индекс дробности это – количество контуров на единицу площади, га, а индекс расчлененности – отношение периметра контура (м) к его площади (м²).

Оценка соотношения пограничных и однородных пикселей проводилась с помощью скользящего окна. В процессе сдвига квадратного полигона фиксированного размера на заданное расстояние, не превышающее сторону полигона, для каждого числа перекрываемых контуров подсчитывалось число соответствующих полигонов. Для этого был разработан программный модуль, интегрированный в распределенную геоинформационную систему, разрабатываемую в ИВТ СО РАН [12]. Анализ результатов подсчетов позволил выбрать оптимальное разрешение для изучения конкретных ландшафтов.

Результаты и обсуждение

Общая площадь дешифрирования составила 62.2 км². Результаты дешифрирования позволили выявить характерные особенности различных ландшафтов, кроме долин рек и озерных депрессий. Площадь дешифрирования и количество контуров для этих ландшафтов оказалось сравнительно небольшим, что не позволяет уверенно говорить об их особенностях.

Таблица. Характеристики контуров.

	Площадь, км ²	Длина границ, км	Количество контуров	Ср. площадь, га	Ср. периметр, м	K_1	Средний K_2
Увалы с автоморфными лесами	47.5	905	807	5.88±1.64	1122±129	0.17	0.035±0.001
Депрессии с заболоченными лесами	8.4	469	1014	0.82±0.06	463±23	1.21	0.089±0.002
Плоскобугристые болота	3.3	433	2194	0.15±0.01	198±9	6.75	0.124±0.001
Грядово-мочажинные болота	0.8	137	609	0.14±0.01	226±16	7.39	0.139±0.002
Долины рек	1.4	56	89	1.58±0.61	635±136	0.63	0.060±0.004
Озерные депрессии	0.8	37	84	0.96±0.29	445±68	1.05	0.071±0.004
Всего	62.2	2040	4797				

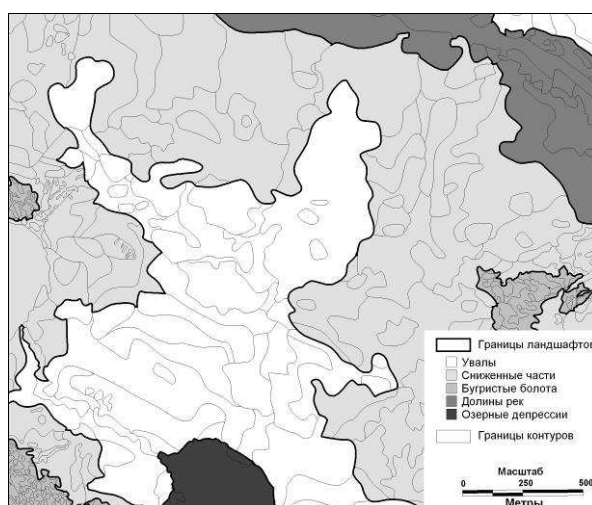


Рис. 1. Фрагмент дешифрирования снимка.

На дренируемых приподнятых частях увалов, где сравнительно небольшие перепады высот не оказывают влияние на гидротермические условия, со сравнительно монотонной растительностью выделяются крупные контуры, часто с неясными границами (рис. 1), ландшафт в целом отличается

наименьшими значениями индекса дробности и среднего индекса расчлененности (табл.). На сниженных частях увалов и заболоченных депрессиях из-за большого влияния микро- и мезорельефа на режим увлажнения, ландшафт более пестрый. Здесь выделяется большее количество элементарных контуров сравнительно небольших размеров, а ландшафт в целом отличается большей расчлененностью и насыщенностью контурами.

Морфометрия болотных ландшафтов резко отличается от автоморфных и полугидроморфных. Оба ландшафта отличаются небольшими по площади элементарными контурами и большими значениями индекса дробности и среднего индекса расчлененности, что связано со специфическим сочетанием ландшафтных фаций (рис. 2, 3). При близких значениях средней площади элементарного контура ($t = 0.637$), расчлененность ландшафта грядово-мочажинных болот значительно ($t = -5.535$) выше расчлененности плоскобугристых болот, что связано с вытянутостью контуров гряд и мочагин (рис. 3).

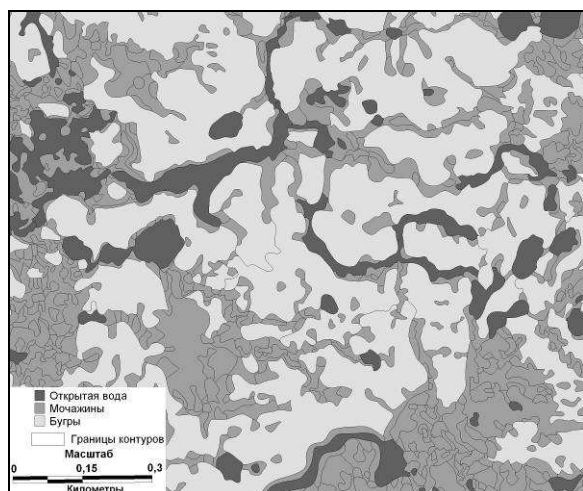


Рис. 2. Фрагмент плоскобугристого болота.

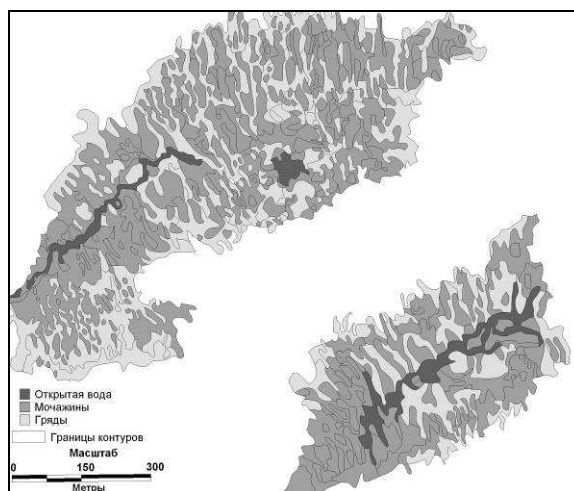


Рис. 3. Фрагменты грядово-мочажинного болота.

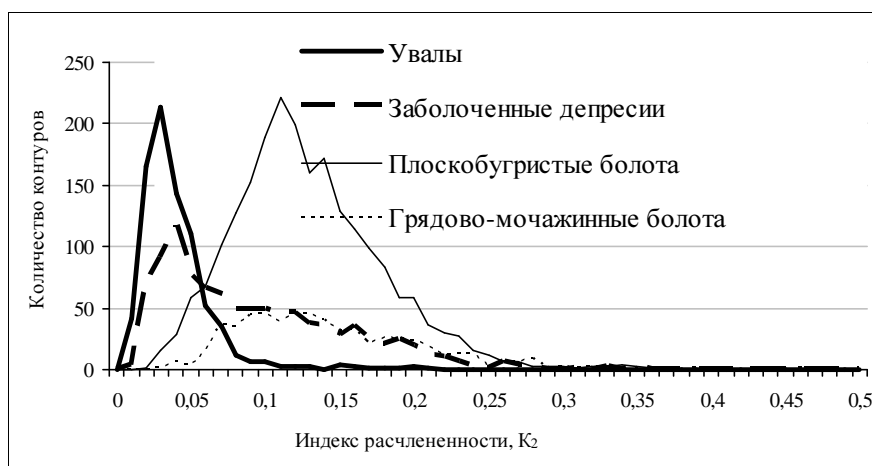


Рис. 4. Частоты распределения индекса расчлененности.

Для элементарных контуров всех ландшафтов характерна некоторая асимметрия частот распределения индекса расчлененности (рис. 4). Асимметрия распределения особенно заметна для заболоченных депрессий и грядово-мочажинных болот. В обоих случаях это объясняется менее однородными условиями и характером фаций, входящих в эти ландшафты.

В первом случае эта асимметрия связана с неоднородностью градиентных условий заболоченных депрессий, ландшафт которых объединяет контуры разной геометрии: небольшие «острова» суходольных лесов, сравнительно однородные участки заболоченных лесов и небольшие фрагменты бугристых болот. Во втором случае неоднородный характер геометрии связан с тем, что помимо сходных контуров гряд и мочагин в ландшафт грядово-мочажинных болот вошли и контуры периферии болот с фрагментами заболоченных лесов и обширных осоково-сфагновых болот, фрагменты внутренней гидросети, внутренние озера.

Ландшафты увалов и плоскобугристых болот отличаются более однородными условиями и контурами близкой геометрии – чередованием повышения и понижений в первом случае, и однотипных мерзлых бугров и мочагин – во втором. Кроме того, для этих ландшафтов характерны сравнительно четкие границы переходов к соседним ландшафтам.

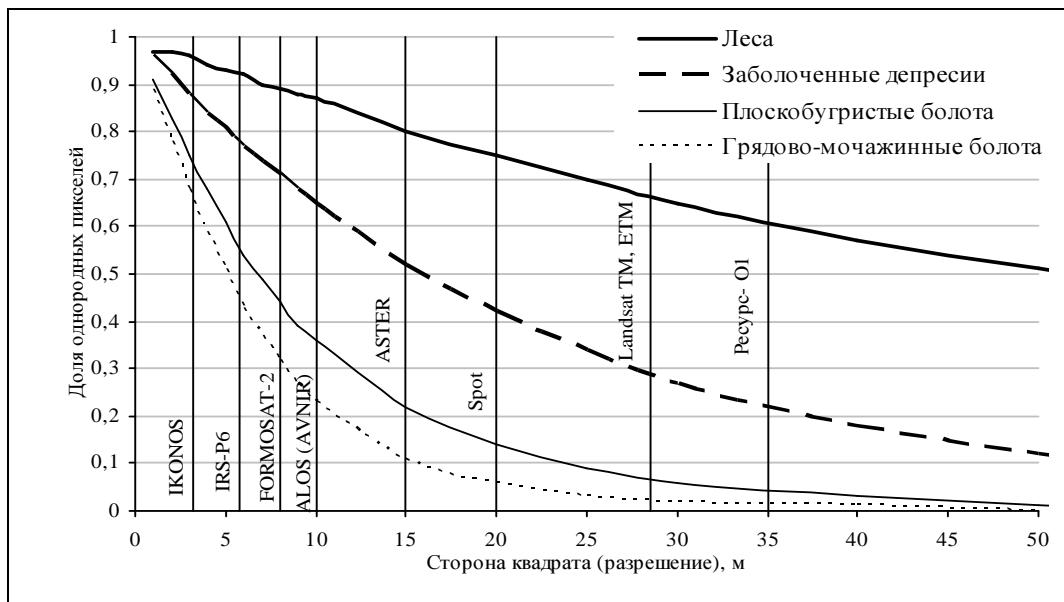


Рис. 5. Зависимость доли однородных пикселей от разрешения для разных ландшафтов и разрешение некоторых сканеров.

Как и следовало ожидать, с уменьшением разрешения, доля однородных пикселей уменьшается для всех типов ландшафта (рис. 5). Ожидаемой оказалась и скорость уменьшения доли однородных пикселей для ландшафтов с большей насыщенностью контурами на единицу площади. Это свойство особенно контрастно для увалов с крупными контурами и болотами. Если на изображениях болот с пространственным разрешением 1 м доля пограничных пикселей не превышает 0.1, а на изображениях увалов – еще меньше, то на изображениях болотных ландшафтов с разрешением 25–30 м, доля однородных пикселей составляет не более 0.05, а при разрешении 50 м однородных пикселей вообще не остается. На изображениях увалов при таком разрешении однородными остается около половины пикселей, а существенное снижение доли однородных пикселей, меньше 0.1, наблюдается при разрешении 250–300 м.

На изображениях увалов с разрешением 4 м доля однородных пикселей составляет 0.94, и при дальнейшем увеличении разрешения меняется незначительно. Для остальных ландшафтов такая стабилизация изображения возникает, очевидно, при разрешении снимка меньше 1 м.

С уменьшением разрешения растет и доля пикселей, включающих более двух контуров (рис. 6), что еще больше снижает информативность изображения. Для ландшафтов с большой дробностью контуров при разрешении 10 м около трети пикселей перекрывают 3 и более контуров, а при разрешении 20 м их уже около половины.

Задача тематического картографирования методами классификации изображений всегда сопряжена с проблемой выбора оптимального разрешения. Этот выбор, по сути, сводится к тому, что при увеличении разрешения, т.е. уменьшении размеров пикселя, уменьшается доля смешанных, плохо классифицируемых пикселей и, соответственно увеличивается доля однородных пикселей, которые можно соотнести с конкретными единицами картографирования. Но при увеличении разрешения неизбежно усиливается информационный «шум», связанный с относительной неоднородностью изображения в пределах тематически однородного пространства. Например, в случае рассмотренных ландшафтов, для анализа и классификации изображений болот, особенно грядово-мочажинных, наиболее информативно разрешение с размером пикселей менее 5 м, когда по крайней мере больше половины пикселей можно уверенно идентифицировать с тем или иным элементом ландшафта. Однако при таком разрешении на изображениях лесных сообществ увеличивается варьирование, связанное с неоднородностью древесного яруса, тенями крон и синузальной неоднородности напочвенного покрова. Для таких, а вероятно и всех лесных ландшафтов, наиболее оптимальным будет использование изображений с разрешением 10 – 30 м/пиксель.

Если говорить о конкретных источниках изображений, то для тематического картографирования болотных ландшафтов северной тайги методом классификации изображений наиболее информативны, например, данные спектральных каналов IKONOS и IRS-P6, а для картографирования лесных ландшафтов – ASTER, Spot, Landsat (TM, ETM) и Ресурс-01. При этом использование снимков IKONOS и IRS-P6 для дешифрирования лесных ландшафтов будет сопряжено с проблемами внутриценотической неоднородности – крон деревьев, теней и т.д. При сочетании типов ландшафта, представленных на ключевом участке компромиссный выбор разрешения, вероятно составит около 10 м/пиксель, при котором будет минимизировано количество пограничных пикселей и минимизирован эффект информационного шума, т.е., например, данные ALOS (AVNIR) и FORMOSAT-2.

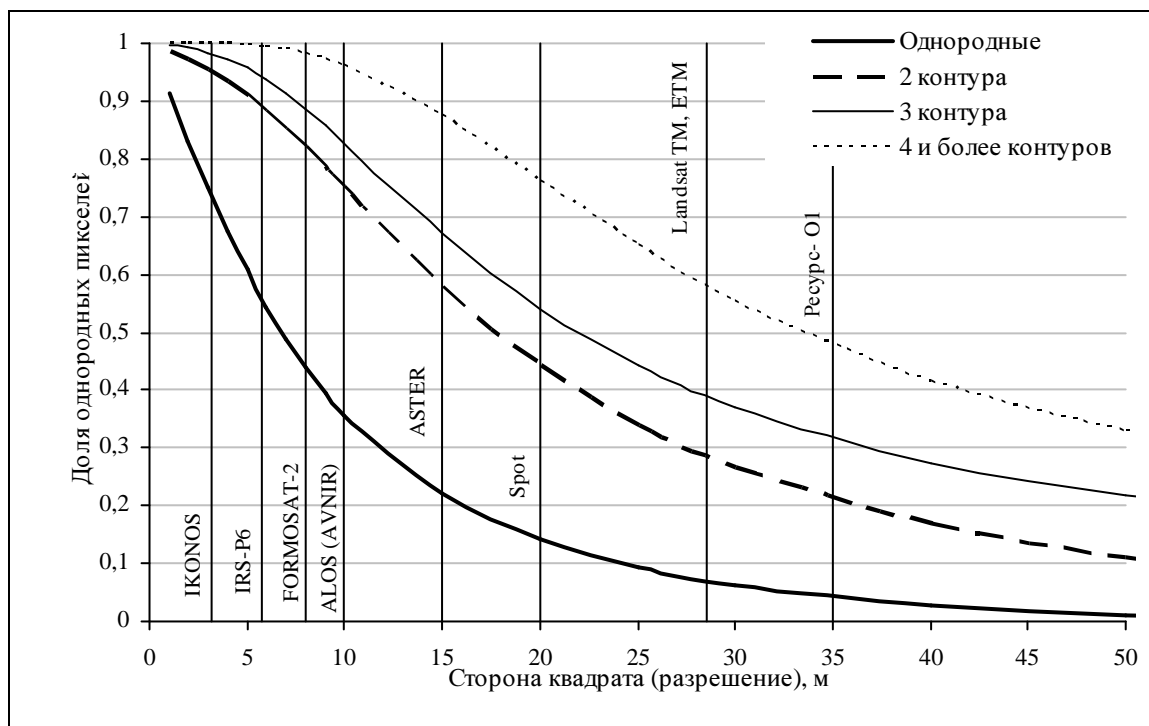


Рис. 6. Доля пикселей, включающих разное количество контуров для ландшафта плоскобугристых болот и разрешение некоторых сканеров.

Очевидно, что при любом выборе изображения некоторая часть пикселей окажется на границах тематических выделов, и эту часть изображения невозможно будет уверенно сопоставить с тематическими единицами картографирования. В зависимости от морфометрических особенностей ландшафта, сочетания типов ландшафтных единиц и выбора изображения, доля пограничных пикселей может оказаться чрезвычайно высокой, и в этом случае часть тематических единиц может вообще не найти отображения в результатах классификации.

Литература

1. Васильев С.В., Гаджиев И.М., Сеньков А.А., Смоленцев Б.А. Мониторинг состояния почвенного покрова на ноябрьском экологическом полигоне (Западная Сибирь) // Антропогенная деградация почвенного покрова и меры ее предупреждения: Тез. и докл. Всерос. конф. (Москва, 16–18 июня 1998 г.). Т. 1. М., 1998. С. 159-160.
2. Викторов А.С. Рисунок ландшафта. М.: «Мысль», 1986.
3. Земцов А. А. Исследования Сибирских увалов. География и природные ресурсы. 2000. № 1. С. 76-81.
4. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 370 с.
5. Классификация почв России. Составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 1997. 236 с.
6. Крылов Г.В. Леса Западной Сибири. М.: Изд. АН СССР. 1961. 254 с.
7. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
8. Смоленцев Б.А. Структура почвенного покрова Сибирских Увалов (северо-таежная подзона Западной Сибири). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 118 с.
9. Солнцев В. Н. Системная организация ландшафтов. М.: Мысль. 1981. 239 с.
10. Сукачев В. Н. Биогеоценоз как выражение взаимодействия живой и неживой природы на поверхности Земли: соотношение понятий «биогеоценоз», «экосистема», «географический ландшафт» и «фация» // Основы лесной биогеоценологии / Под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М.: Наука, 1964. С. 5-49.
11. Сукачев В.Н. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Избр. тр. Л.: Наука, 1972. Т. 3. 543 с.
12. Шокин Ю.И., Пестунов И.А., Смирнов В.В. и др. Распределенная информационная система сбора, хранения и обработки спутниковых данных для мониторинга территорий Сибири и Дальнего Востока // Журн. Сибирского фед. ун-та. Техника и технологии. 2008. Т. 1, Вып. 4. С. 291-314.

Эволюция пограничного слоя и особенности загрязнения атмосферы в условиях города

М.А. Битехтина¹, С.В. Михайлюта², О.В. Тасейко³, А.А. Леженин⁴

¹ ГОУ ВПО «Сибирский государственный технологический университет», Красноярск

² ООО «Северная геолого-поисковая экологическая партия», Красноярский край

³ СибГАУ, НП «Центр Прикладной Геоэкологии», Красноярск

⁴ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха в городах проводятся для получения информации, необходимой для эффективного управления качеством жизни и здоровья населения. При этом основным фактором способствующим очищению атмосферы или приводящим к ее экстремально высокому загрязнению является состояние пограничного слоя атмосферы.

В этой работе на основе данных микроволнового зондирования пограничного слоя атмосферы описаны особенности эволюции городского пограничного слоя на примере г. Красноярска. Изменение в вертикальном распределении температуры над городом определяет типы суточной динамики в приземном слое атмосферы. По результатам исследования вертикальных профилей температуры и непрерывных измерений концентраций загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы на территории Красноярска выявлены условия формирования экстремально высоких уровней загрязнения атмосферы. Описаны величина и длительность экспозиции загрязняющих веществ, которые дают детальные представления о формируемых на территории города дозовых нагрузках загрязняющих веществ при различных метеорологических процессах разного масштаба.

Основной целью данной работы является расширение имеющихся представлений об особенностях пограничного слоя атмосферы в контексте загрязнения атмосферного воздуха на территории города. Поставленная цель достигается путем использования новейших средств измерения вертикального профиля температуры и результатов непрерывных измерений концентраций загрязняющих веществ на территории города Красноярска.

Традиционно для измерения профилей температуры атмосферы использовались контактные датчики, поднимаемые на радиозондах, привязных и свободных аэростатах, самолетах, метеорологических ракетах, либо установленные на высотных метеорологических мачтах. Эти средства измерений не отвечали основным требованиям наблюдений термической структуры АПС – непрерывности, мобильности, всепогодности, низкой эксплуатационной стоимости.

Измерительный комплекс МТП-5 позволяет отображать термическую структуру нижнего 600-метрового слоя атмосферы и получать ее временную динамику с большим разрешением.

Начиная с 2004 года на территории г. Красноярска проводились измерения профилей температуры городского пограничного слоя с помощью микроволнового температурного профилемера, установленного в центральной части города. Измерения проводились непрерывно в течение нескольких лет, что позволило получить данные о вертикальной структуре городского острова тепла, ее суточной и сезонной изменчивости. Это дало возможность оценить влияние города на структуру АПС.

Описаны условия формирования экстремально высоких уровней загрязнения. Проанализирована суточная динамика загрязнения атмосферы города основными загрязнителями по результатам непрерывных измерений с помощью автономного автоматического газоаналитического комплекса.

Полученные результаты, характеризующие условия формирования уровней загрязнения атмосферного воздуха, определяемых эволюцией пограничного слоя атмосферы, являются основой формирования эффективной системы мониторинга городской атмосферы, а также позволяют получить необходимую информацию для оценки воздействия загрязнений на заболеваемость и смертность населения.

Обнаружение на естественном фоне объектов техносферы на основе поиска пространственных аномалий

С.М. Борзов, О.Ю. Дашевский, О.И. Потатуркин

Институт автоматике и электротметрии Сибирского отделения РАН, Новосибирск

При решении задачи обнаружения объектов техносферы на естественном фоне могут быть использованы два подхода: поиск объектов, обладающих определенными характеристиками, и поиск пространственных аномалий. При реализации первого - необходимо иметь описание всех обнаруживаемых объектов и в соответствии с ним осуществлять поиск на контролируемой сцене. Второй – более универсальный, он основан на создании описания типичных классов отсчетов (с учетом параметров окрестности) для каждой сцены и поиска отклонений от созданного описания. Недостатком первого подхода является то, что при его использовании могут быть обнаружены лишь заданные наперед известные объекты, недостатком второго - высокая вероятность ложных обнаружений.

В работе приведены результаты исследований эффективности как традиционных, так и предложенных авторами ранее пространственных признаков при обнаружении объектов техносферы на естественном фоне по изображениям видимого и тепловизионного спектральных диапазонов с использованием методов поиска пространственных аномалий.

На примере обработки реальных данных показано, что эти методы позволяют обнаруживать объекты в поле зрения системы наблюдения, основываясь на несоответствии параметров их изображений параметрам фона. Они могут быть использованы для оперативного поиска нагретых объектов по тепловизионным изображениям в условиях естественного фона, а также для обнаружения объектов техносферы по изображениям видимого диапазона. При этом при поиске антропогенных зон на изображениях высокого разрешения большей эффективностью, по сравнению с классическими текстурными признаками, обладают признаки, сформированные на основе функции отклика Харриса.

Оценка экологической безопасности атмосферного воздуха на основе решения уравнений Колмогорова

Т.В. Гавриленко¹, О.В. Адмаев²

¹ ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск

² Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Красноярск

Оценка состояния воздушной среды больших городов представляет собой актуальную задачу. Методики прогноза базируются на различных математических моделях, использующих как аппарат дифференциальных уравнений, так и вероятностно-статистические методы. В данной работе для прогноза состояний воздушной среды города рассматривается математическая модель, основанная на однородных марковских случайных процессах.

Пусть атмосферный воздух в исследуемом районе города представляет собой систему $S(t)$, принимающую в момент времени t какое-либо из n возможных состояний s_1, s_2, \dots, s_n . Случайный процесс, протекающий в системе $S(t)$ с дискретными состояниями s_1, s_2, \dots, s_n , будем считать Марковским. Это означает, что для любого момента времени t_0 вероятность каждого из состояний системы в будущем (при $t > t_0$) зависит только от ее состояния в настоящем ($t=t_0$) и не зависит от ее поведения в прошлом ($t < t_0$) [1].

В настоящее время для оценки загрязнения атмосферного воздуха используется интегральный показатель – индекс загрязнения атмосферы, рассчитываемый по пяти наиболее значимым ингредиентам:

$$ИЗА_5 = \sum_{i=1}^5 q_i,$$

где

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{ПДК,i}},$$

Q_i – концентрация i -го вещества в конкретный срок наблюдений, $Q_{ПДК,i}$ – его предельно допустимая концентрация. Например, для г. Красноярска наиболее значимыми ингредиентами считаются бенз/а/пирен, взвешенные вещества, формальдегид, диоксид азота и оксид азота. Их предельно допустимые концентрации и класс опасности приведены в табл.1 [2,3].

Таблица 1. Характеристики веществ, учитываемых в индексе загрязнения атмосферы.

Вещество	ПДК максимально разовая мг/м ³	ПДК среднесуточная мг/м ³	Класс опасности
Бенз/а/пирен	-	$0.1 \cdot 10^{-5}$	1
Формальдегид	0.035	0.003	2
Взвешенные вещества	0.5	0.15	3
Диоксид азота	0.2	0.04	2
Оксид азота	0.4	0.06	3

Кроме показателя $ИЗА_5$ загрязнение атмосферного воздуха можно оценивать по зависимости

$$C = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 q_i. \quad (1)$$

Показатель (1) является более удобным, т.к. он представляет не сумму средних значений концентраций веществ, как $ИЗА_5$, а среднюю концентрацию всех наиболее значимых веществ. Это позволяет оценить во сколько раз среднее значение этих веществ превышает их ПДК [4].

В зависимости от значения показателя $ИЗА_5$ (или C) выделяют пять состояний атмосферного воздуха, соответствующих различным степеням его загрязнения. Характеристики состояний приведены в табл. 2.

Табл. 2. Классификация состояний воздушной среды [4].

Состояние	Обозначение	Загрязнение воздушной среды	Показатель $ИЗА_5$	Показатель C
1	s_1	Малое	Менее 5.0	Менее 1.0
2	s_2	Умеренное	От 5.0 до 7.0	От 1.0 до 1.4
3	s_3	Высокое	От 7.0 до 14.0	От 1.4 до 2.8
4	s_4	Очень высокое	От 14.0 до 21.0	От 2.8 до 4.2
5	s_5	Экстремально высокое	Более 21.0	Более 4.2

Таким образом, систему $S(t)$ можно представить в виде ориентированного графа, вершины которого соответствуют состояниям воздушной среды ($n=5$), а стрелки – возможностям перехода из одного состояния в другое (рис. 1).

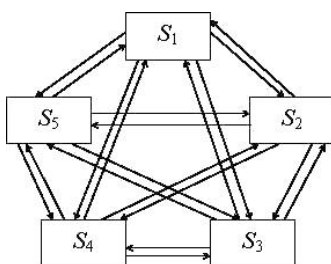


Рис. 1. Граф, описывающий состояние атмосферного воздуха.

Обозначим вероятность i -го состояния в момент t (вероятность события, состоящего в том, что в момент t система $S(t)$ будет находиться в состоянии s_i) как $p_i(t) = P\{S(t) = s_i\}$. Очевидно, что для системы с дискретными состояниями в любой момент времени t сумма вероятностей состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^5 p_i(t) = 1,$$

так как в любой момент времени t события $\{S(t) = s_1\}, \{S(t) = s_2\}, \dots, \{S(t) = s_5\}$ образуют полную группу несовместных событий.

Предполагаем, что переходы из состояния в состояние происходят под воздействием стационарных пуассоновских потоков событий. Вероятность перехода системы $S(t)$ из состояния $s_i = S(t)$, в состояние $s_j = S(t+\Delta t)$ за элементарный промежуток времени Δt ,

$$p_{ij}(t) \approx \lambda_{ij} \Delta t,$$

где λ_{ij} – интенсивность пуассоновского потока событий, переводящего систему из s_i в s_j . Тогда граф описывается системой из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений Колмогорова [1]:

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^5 p_j(t) \lambda_{ji} - p_i(t) \sum_{j=1}^5 \lambda_{ij}, \quad i=1, \dots, 5. \quad (2)$$

Первая сумма в правой части уравнений системы (2) распространяется на значения j , для которых возможен непосредственный переход из состояния s_j в s_i (т.е. $\lambda_{ji} \neq 0$), а вторая – на значения j , для которых возможен непосредственный переход из s_i в s_j (т.е. $\lambda_{ij} \neq 0$).

Система (2) решается при начальных условиях

$$p_1(0) = p_1^0; p_2(0) = p_2^0; p_3(0) = p_3^0; p_4(0) = p_4^0; p_5(0) = p_5^0. \quad (3)$$

Оценка интенсивностей λ_{ij} производится по агрегированной информации в виде относительных частот состояний системы $S(t)$ в каждый из моментов времени t . В этом случае выборочные наблюдения за состоянием атмосферы удовлетворяют стохастическому уравнению

$$\mathbf{y}_j(t + \Delta t) = \sum_{i=1}^5 \mathbf{y}_i(t) \lambda_{ij} + \mathbf{u}_j(t + \Delta t), \quad (4)$$

где $\mathbf{y}_i(t)$ – вектор наблюдавшихся частот появления состояния s_i (в момент времени t); $\mathbf{y}_j(t + \Delta t)$ – вектор наблюдавшихся частот появления состояния s_j (в момент времени $t + \Delta t$); $\mathbf{u}_j(t + \Delta t)$ – вектор случайных ошибок [5].

При $\Delta t=1$ уравнение (4) переписывается в виде

$$\mathbf{y}_j(t + 1) = \sum_{i=1}^5 \mathbf{y}_i(t) \lambda_{ij} + \mathbf{u}_j(t + 1). \quad (5)$$

Интенсивности λ_{ij} определяются методом наименьших квадратов с ограничениями, так как обычные оценки по методу наименьших квадратов могут не удовлетворять условиям

$$0 \leq \lambda_{ij} \leq 1, \quad i, j = 1, \dots, 5.$$

В данном методе требуется найти минимум квадратичной формы

$$F = \sum_{j=1}^5 \mathbf{u}_j' \mathbf{u}_j = \sum_{j=1}^5 (\mathbf{y}_j - X_j \lambda_j)' \cdot (\mathbf{y}_j - X_j \lambda_j), \quad (6)$$

где

$$\mathbf{y}_j = \{y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(T)\}, \quad \mathbf{u}_j = \{u_j(1), u_j(2), \dots, u_j(T)\}, \quad \lambda_j = \{\lambda_{1j}, \lambda_{2j}, \dots, \lambda_{5j}\},$$

$$X_j = \begin{pmatrix} y_1(0) & y_2(0) & \dots & y_5(0) \\ y_1(1) & y_2(1) & \dots & y_5(1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1(T-1) & y_2(T-1) & \dots & y_5(T-1) \end{pmatrix},$$

T – длина выборки.

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации интенсивностей λ_{ij} определяется по формуле

$$\varepsilon_j = \sqrt{\sum_{t=1}^T u_j^2(t) / T},$$

где $u_j(t)$ – компоненты вектора случайных ошибок, определяемые из уравнения (5), $j=1, \dots, 5$. В более подробном виде алгоритм нахождения минимума формы (6) изложен в [6].

Применение изложенной методики проиллюстрируем на примере, в котором моделирование случайного процесса проводится с помощью пары независимых стандартных нормальных (т.е. гауссовских с нулевым средним и единичной дисперсией) случайных величин x_1 и x_2 , определяемых по формулам

$$x_1 = (-\ln \alpha_1)^{-1/2} \cos(2\pi\alpha_2), \quad x_2 = (-\ln \alpha_1)^{-1/2} \sin(2\pi\alpha_2),$$

где α_1 и α_2 – случайные равномерно распределенные величины из интервала от 0 до 1, генерируемые датчиком псевдослучайных чисел [7].

Каждая выборка представляет собой модель изменения средненедельного показателя C , в течение календарного года. Средние значения примем по среднегодовым показателям ИЗА₅, пересчитанным по формуле (1). Среднегодовые значения ИЗА₅, в г. Красноярске, наблюдавшиеся в период с 1997 г. по 2010 г., приведены на рис. 2 [2]. Коэффициент вариации принимается равным 0,32.

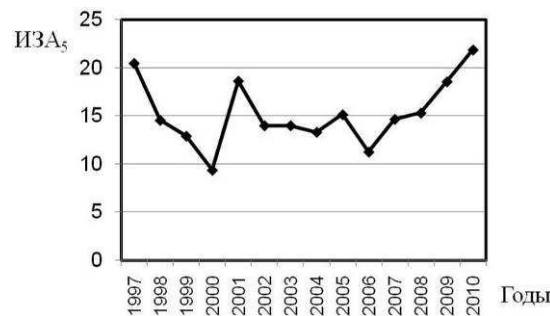


Рис. 2. Изменение индекса загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА₅) в г. Красноярске.

В итоге было построено 14 реализаций случайного процесса изменений показателя C , один из которых (для данных 2010 года) приведен на рис. 3.

В результате расчетов была получена матрица интенсивностей вероятностей перехода

$$\|\lambda_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0,487 & 0,169 & 0,344 & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,0 & 1,0 & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & 0,394 & 0,425 & 0,181 \\ 0,023 & 0,043 & 0,361 & 0,429 & 0,144 \\ 0,0 & 0,0 & 0,723 & 0,277 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

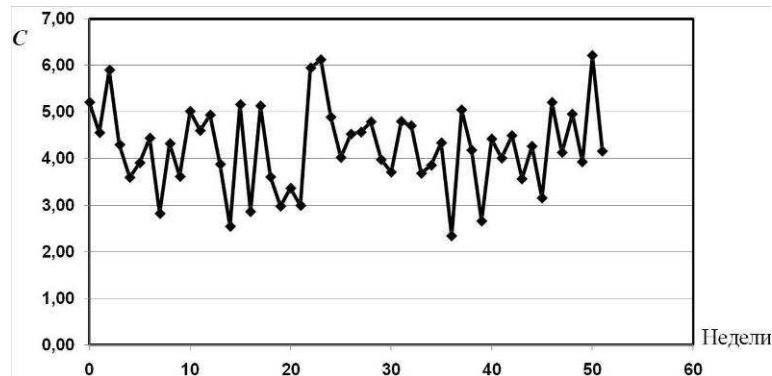


Рис. 3. Модель реализации случайного процесса изменения показателя C .

Подставляя значения элементов матрицы (7) в уравнение (2), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = 0,023p_4 - p_1(0,169 + 0,344), \\ \frac{dp_2}{dt} = 0,169p_1 + 0,043p_4 - p_2, \\ \frac{dp_3}{dt} = 0,344p_1 + 0,361p_4 + 0,723p_3 - p_3(0,425 + 0,181), \\ \frac{dp_4}{dt} = p_2 + 0,425p_3 + 0,277p_5 - p_4(0,023 + 0,043 + 0,361 + 0,144), \\ \frac{dp_5}{dt} = 0,181p_3 + 0,144p_4 - p_5(0,723 + 0,277). \end{cases}$$

После преобразований данная система примет вид

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = -0,513p_1 + 0,023p_4, \\ \frac{dp_2}{dt} = 0,169p_1 - p_2 + 0,043p_4, \\ \frac{dp_3}{dt} = 0,344p_1 - 0,606p_3 + 0,361p_4 + 0,723p_5, \\ \frac{dp_4}{dt} = p_2 + 0,425p_3 - 0,571p_4 + 0,277p_5, \\ \frac{dp_5}{dt} = 0,181p_3 + 0,144p_4 - p_5. \end{cases}$$

Ее решение находится численно методом Рунге – Кутты четвертого порядка при начальных условиях (3). Расчеты показали, что система выходит на стационарный режим. При этом время его достижения сильно зависит от выбора начальных условий. На рис. 4 приведены решения при различных начальных условиях: слева – при $p_i(0)=0.2; i=1, \dots, 5$; справа – при $p_1(0)=1; p_i(0)=0; i=2, \dots, 5$. Вероятности наступления состояний загрязнения воздушной среды достигают значений $p_1=0.027; p_2=0.031; p_3=0.202; p_4=0.615; p_5=0.125$ соответственно для малого, умеренного, высокого, очень высокого и экстремально высокого уровней загрязнения.

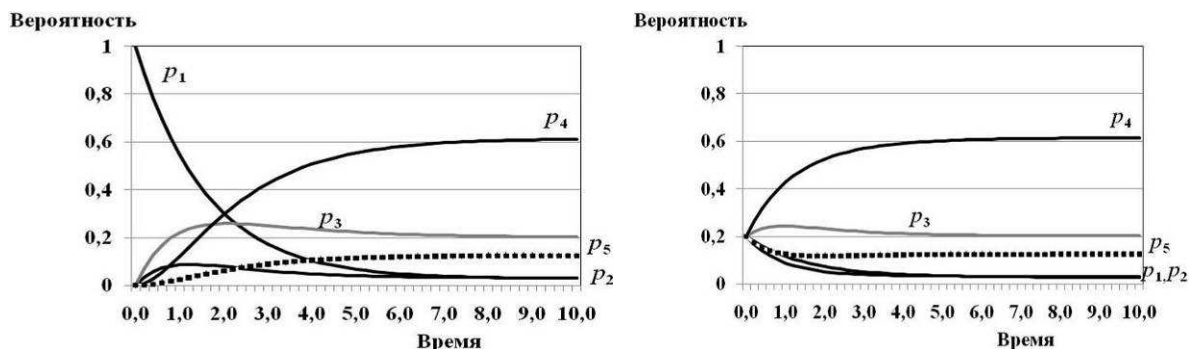


Рис. 4. Вероятности наступления состояний воздушной среды при различных начальных условиях.

Среднеквадратическая ошибка аппроксимации интенсивностей λ_{ij} составила $\varepsilon_1=0.01; \varepsilon_2=0.03; \varepsilon_3=0.1; \varepsilon_4=0.24; \varepsilon_5=0.12$.

Выводы

1. Наиболее вероятным состоянием системы является уровень очень высокого загрязнения атмосферного воздуха. Его вероятность составляет 0.615.
2. Вероятность состояний, характеризующихся малым и умеренным уровнем загрязнения, в рассмотренном примере пренебрежимо малы: $p_1=0.027$ и $p_2=0.031$.
3. Время выхода системы на стационарный режим существенно зависит от вида начальных условий.
4. Среднеквадратическая ошибка характеризуется большим разбросом значений от 0.1 до 0.25 и является максимальной для наиболее вероятного состояния.

Литература

1. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 384 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае за 2009 год». Красноярск, 2010. 237 с.
3. <http://meteo.krasnoyarsk.ru/МониторингОС>
4. Сверлова Л.И. Научные основы современного подхода к оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха городов // Успехи современного естествознания. 2009. № 7. С. 20-22.
5. Ли Ц., Джардж Д., Зельнер А. Оценивание параметров марковских моделей по агрегированным временным рядам: Пер. с англ. М.: Статистика, 1977. 221 с.
6. Адмаев О.В., Гавриленко Т.В. Использование марковских процессов для оценки экологической безопасности воздушного пространства города // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1087-1090.
7. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей /Отв. Ред. Г.А. Михайлов. Новосибирск: ИВМи МГ СО РАН, 2005. 259 с.

Разработка математической модели оценки риска при анализе состояния и мониторинга окружающей среды

Н.П. Гончарова

Воронежский институт высоких технологий

В настоящее время идет активное использование природной среды людьми с точки зрения ее, как богатейшего источника разных ресурсов. Однако при этом могут существовать и обратные процессы, связанные с воздействием людей на окружающую среду. В процессе использования ресурсы могут видоизменяться, возвращаться в окружающую среду. Иногда после преобразования они могут быть достаточно опасными и вредными. То есть, с одной стороны необходимо стремиться к совершенствованию условий жизни человечества, но, в то же время, необходимо стремиться к сохранению безопасного существования [1-5].

Существуют различные виды ресурсов, рассмотрим некоторые из них.

1) Жизнь живых существ, в том числе и человека, невозможно представить без использования водных ресурсов.

Реки и моря могут служить, как транспортные магистрали, связывающие различные населенные пункты. С развитием цивилизации проходило совершенствование конструкций и технологий построения водоотводящих систем и сооружений. Они обеспечивают требуемые санитарно-гигиенические условия труда и повседневной жизни. В состав систем водоотведения и очистки входит различное специальное оборудование, различные сети и сооружения, которые позволяют проводить прием и очистку бытовых, а также промышленных сточных вод. После очистки эти воды могут сбрасываться в водоем. Сейчас на нашей планете довольно много мест, где сейчас ощущается дефицит пресной воды.

Необходимо проводить оценку требуемого числа воды для предприятий, а также для жилых районов.

2) При использовании различных минеральных ресурсов, в том числе, топливных, их большая часть превращается в отходы, которые в лучшем случае утилизируются на свалке, а в худшем – сильно загрязняют окружающую среду, могут привести к губительному воздействию на флору и фауну региона, а также к отрицательному воздействию на здоровье человека. В современных условиях важно использовать передовые технологии, которые направлены на переработку и многократное использование отходов этих ресурсов.

3) Человечество довольно давно использует почвенные ресурсы для выращивания большого числа продовольственных культур. Если при этом почвы для посевов будут неправильно использоваться, будет проходить их загрязнение какими-либо отходами, то это может привести к снижению их плодородия. Существуют многочисленные примеры в истории, как люди иссушили большие площади плодородных земель, то есть, фактически, земля превратилась в пустыню, некоторые виды растений исчезли навсегда. А ведь в конечном счете плодородие почв напрямую связано с проблемой пропитания большого числа людей и выживание их в определенном регионе.

4) В настоящее время идет ежегодное уменьшение лесного покрова Земли. Это связано со многими причинами:

1. Люди осваивают новые территории для постройки жилья, прокладывают дороги, коммуникации.
2. Лес может использоваться как топливо.
3. Дерево используется в промышленности.

Однако лесные массивы являются «легкими» нашей планеты, обеспечивающими выработку кислорода. Там, где лесов мало, лесные ресурсы надо расходовать очень бережно, с постоянной заботой об их возобновлении. В некоторых регионах видно, как уничтожение лесов приводит к необратимым изменениям в окружающей среде. Охрана леса означает одновременно охрану и животного мира, который в нем существует. Лес важен как место отдыха людей.

5) Вторичная переработка сырья. Сбор бумажной макулатуры, металлического лома и стеклобоя позволяет вторично использовать эти материалы. При сборе мусора важно предусмотреть возможность сортировки таких разных материалов.

6) Применение ресурсосберегающих технологий. В настоящее время идет работа по созданию объектов техники не из цельного металла, поскольку при этом довольно большое количество материала уходит в стружку, а с использованием порошковой металлургии. Такие технологии также облегчают проведение утилизации. Также идет поиск материалов на основе полимеров со свойствами прочности близкие к металлам, которые когда будут находиться в отходах, легко разлагаются и не наносят вред окружающей среде.

7) Сейчас ведутся работы по поиску возможностей получения из сырья различных полезных веществ. Это позволит наладить комплексное производство товаров, для разнообразных отраслей народного хозяйства.

8) Повышение срока службы продукции. Данный подход выгоден не только с точки зрения применения новых материалов, но и также дает толчок в развитии новых технологий [6]. Чем дольше будет служить объект, тем меньше их будет скапливаться на различных свалках.

9) Применение информационных технологий позволяет снизить энергоемкость и материалоемкость продукции. Весь технологический процесс может быть настроен и отлажен, что позволит существенно снизить отходы производства.

Планируя защиту экологических объектов, необходимо стремиться к тому, чтобы она была комплексной, поскольку, чрезмерная и интенсивная защита одного такого объекта может нанести вред другому объекту. Необходимо учитывать вклад различных компонент, которые объединены многолетними сложившимися связями.

Следует отметить, что существует, так называемое правило региональности, которое требует рассмотрение конкретного природного ресурса относительно конкретного региона и в связи с конкретными другими факторами в этом регионе.

В данной работе мы предлагаем методику, которая может быть использована различными организациями при оценке состояния окружающей среды. Она позволяет организациям проводить достаточно подробный анализ различных данных. При построении методики мы пользовались подходом, аналогичным тому, который рассматривается при оценке рисков в информационной безопасности [7-10].

Далее рассматриваются основные параметры, связанные с состоянием окружающей среды, рассматриваются основные составляющие математической модели, рассматривается определенный пример по оценке рисков и, наконец, делаются выводы по работе.

Рассматриваемая методология проводит комплексный анализ различных составляющих и может быть полезной при оценке эффективности возможных мер по защите окружающей среды.

Рассматриваемая методология основана на матричном подходе, в котором приходится использовать несколько матриц: матрицу уязвимостей, матрицу опасностей и матрицу управления, что позволяет объединять все данные с целью оценки риска. Матрица уязвимостей (Таблица 1) содержит связи между составляющими живой среды и уязвимостями. Матрица опасностей (Таблица 2) определяет связи между уязвимостями и опасностями. И, наконец, матрица управления содержит связи между опасностями и управлениями. Каждая ячейка в таблице содержит численное значение, показывающее степень связи между элементами строки и столбца (например, опасностью и уязвимостью). Может быть назначено три уровня: низкий, средний и высокий.

Когда первоначально проводится оценка риска, то генерируются списки опасностей, уязвимых компонент и управлений и затем они добавляются в оценочную таблицу. Матрицы заполняются данными, которые определяют степень корреляции между строками и столбцами. В итоге данные матрицы уязвимостей определяются с использованием выражения (1) и передаются в таблицу 2. Аналогичным образом данные матрицы опасностей определяются на основе выражения (2) и передаются в таблицу 3. Данные матрицы управления затем обрабатываются с целью определения относительной важности различных управляющих воздействий. Используется выражение (3).

Табл. 1. Корреляция между уязвимостями и составляющими живой среды.

Шкала значимости 0 – Нет вклада 1 – Слабый вклад 3 – Средний вклад 9 – Сильный вклад	Составляющие				
	Человек	Рыбы	Животные	Растения	Насекомые
Уязвимые компоненты в регионе					
Водоемы					
Почвы					
Воздушная среда					
Лесные ресурсы					

Мы будем предполагать, что есть m составляющих, где относительная стоимость вклада составляющей a_j будет C_j ($j = 1, \dots, n$). Также будем считать c_{ij} как вклад уязвимости v_i в составляющую a_j . Тогда общий вклад уязвимости v_i на составляющие будет

$$V_i = \sum_{j=1}^n v_{ij} C_j . \quad (1)$$

Табл. 2. Корреляция между уязвимостями и опасностями.

Шкала значимости 0 – Нет вклада 1 – Слабый вклад 3 – Средний вклад 9 – Сильный вклад Опасности	Уязвимые компонен ты в регионе	Водоёмы	Почвы	Воздушная среда	Лесные ресурсы

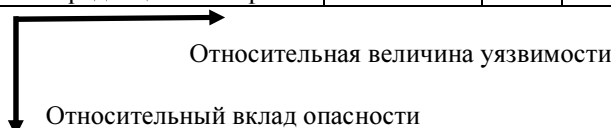
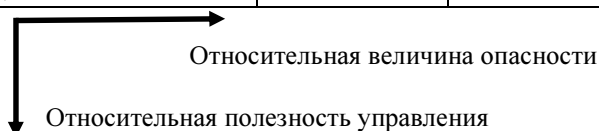


Табл. 3. Корреляция между управлениями и опасностями.

Шкала значимости 0 – Нет вклада 1 – Слабый вклад 3 – Средний вклад 9 – Сильный вклад Управления	Опасности	Засорение промышленным мусором	Засорение бытовым мусором	Болезнетворные микробы	Повышенный радиационный фон



Мы будем считать, что есть p опасностей, которые связаны с n уязвимостями и d_{ki} представляет собой потенциальный вред от опасности t_k в уязвимость v_i . Затем определяется общий вклад опасности T_k . Это делается следующим образом:

$$T_k = \sum_{j=1}^m d_{ki} V_i \quad (2)$$

Мы будем считать, что есть q управлений, которые могут быть связаны с p опасностями, причем e_{lk} определяет влияние управления z_o на опасность t_k . Тогда общий суммарный эффект управления z_o будет:

$$z_o = \sum_{l=1}^p e_{ol} * T_l \quad (3)$$

При изучении рисков необходимо иметь в виду, что в окружающей среде происходит довольно много разнородных процессов.

Для того, чтобы обеспечить необходимую защиту окружающей среды, был проведен анализ состояния окружающей среды для различных условий. В этом случае приходится оценивать риск, связанный с уязвимостями, опасностями и управлениями. Три матрицы, которые имеют дело с уязвимостями, опасностями и управлениями, представлены в таблицах 1, 2 и 3, соответственно.

Таблица 4 заполнена данными из матрицы уязвимостей, которая дает соотношение между уязвимостями и составляющими. Для конструирования матрицы необходимо определить относительную важность составляющей.

Табл. 4. Пример матрицы уязвимостей для определенного региона.

Составляющие	Человек	Рыбы	Животные	Растения	Насекомые	Степень значимости
Шкала значимости 0 – Нет вклада 1 – Слабый вклад 3 – Средний вклад 9 – Сильный вклад						
Ранжирование приоритетов: 1 и 2 малозначимы 3 Важный, но не определяющий 4 Определяющий						
Уязвимые компоненты в регионе	5	4	3	2	1	
Водоемы 4	9	9	3	3	1	97
Воздушная среда 3	9	3	3	3	1	73
Почвы 2	3	3	3	3	3	45
Лесные ресурсы 1	3	1	3	3	3	37

Табл. 5. Пример матрицы опасностей для определенного региона.

Уязвимые компоненты в регионе	Водоемы	Воздушная среда	Почвы	Лесные ресурсы	Степень значимости
Шкала значимости 0 – Нет вклада 1 – Слабый вклад 3 – Средний вклад 9 – Сильный вклад					
Ранжирование приоритетов: 1 и 2 малозначимы 3 Важный, но не определяющий 4 Определяющий					
Опасности	4	3	2	1	
Засорение промышленным мусором 4	9	3	9	1	64
Засорение бытовым мусором 3	9	1	3	1	46
Боллезнетворные микробы 2	3	1	3	3	24
Повышенный радиационный фон 1	1	1	1	1	10

Табл. 6. Пример матрицы управления для определенного региона.

Опасности	Засорение промышленным мусором	Засорение бытовым мусором	Боллезнетворные микробы	Повышенный радиационный фон	Степень значимости
Шкала значимости 0 – Нет вклада 1 – Слабый вклад 3 – Средний вклад 9 – Сильный вклад					
Ранжирование приоритетов: 1 и 2 малозначимы 3 Важный, но не определяющий 4 Определяющий					
Управления	4	3	2	1	
Проведение специальных мероприятий по очистке окружающей среды 4	9	9	3	1	70
Подготовка специалистов 3	9	9	1	1	66
Политика мониторинга 2	9	3	1	1	48
Возможность вторичной переработки ресурсов 1	3	3	3	1	28

Данные в матрице уязвимостей были агрегированы и отсортированы для определения относительной важности уязвимостей. Водные ресурсы могут накапливать в себе большое число вредных факторов, с другой стороны вода необходима при поддержке жизнедеятельности организмов. В этой связи степень

Данные в матрице уязвимостей были агрегированы и отсортированы для определения относительной важности уязвимостей. Водные ресурсы могут накапливать в себе большое число вредных факторов, с другой стороны вода необходима при поддержке жизнедеятельности организмов. В этой связи степень значимости для данного ресурса уязвимости максимальна. Агрегированная матрица уязвимостей добавляется в матрицу опасностей. Эта матрица опасностей приведена в таблице 5.

Таблица 6 показывает матрицу управления, в которой агрегированы данные опасностей и добавлены соответствующие управления. Относительный вклад различных управлений в опасности определяется на основе соответствующей оценки, и данные были агрегированы для определения списка приоритетных управлений. Эта информация вместе со списком стоимости управлений может быть использована при планировании действий по улучшению экологической обстановки в данном регионе.

Выводы

В данной работе представлена методика, которая может быть полезна при оценке экологической обстановки в определенном регионе. В рамках данной методики можно проводить тем точнее оценку, чем больше данных для обработки мы имеем. В связи с тем, что опасности, уязвимые компоненты и другие параметры могут меняться в зависимости от региона, то данный подход может быть уточнен. Рассмотренная методика может быть полезна для организаций, связанных с оценкой экологической обстановки в регионе.

Литература

1. Иванов О.П. Основные направления реформирования современной природно-ресурсной политики России // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2006. № 3. С. 40-45.
2. Калиберда И.В. Оценка параметров внешних воздействий природного и техногенного происхождения // Безопасность объектов использования атомной энергии. М.: «Логос», 2002. 543 с.
3. <http://www.vesti.ru/doc.html?id=329070>.
4. Berg M. Health Information Management: Integrating Information in Health Care Work // M.Berg – Routledge, 2003.
5. www.ecologylife.ru.
6. Бобылев С.Н., Гирусов Э.В., Перелет Р.А. Экономика устойчивого развития (учебное пособие). М.: Изд-во «Ступени», 2004. 303 с.
7. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М.: ФОРУМ «ИНФА-М», 2006. 512 с.
8. Goel S., Chen V. Information security risk analysis – a matrix-based approach.
9. National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-30. July 2008. 54 p.
10. Cox L.A. What's Wrong with Risk Matrices? // Risk Analysis. 2008. Vol. 28, N 2.

Мониторинг нарушений и развитие почвенного покрова в техногенных ландшафтах горно-таежного пояса Кузбасса (на примере г. Междуреченска)

В.Г. Двуреченский

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск

Для того чтобы решить экологические, экономические и социальные проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды, необходимо знать и понимать следующее. Так как техногенные воздействия не только в Кузбассе, но и в России имеют большие масштабы и экологическое разнообразие нарушенных территорий, то проведение динамичного экологического мониторинга нарушенных ландшафтов, а также, разработка методов рекультивации почв техногенных ландшафтов, имеет не только научное, но и практическое, а также экономическое значение.

Добыча и переработка каменного угля всегда сопровождается деградацией флоры и фауны, фактическим истреблением лесных массивов, нарушением естественного ландшафта, загрязнением рек, накоплением большого количества отходов добычи и переработки угля, а также свалками промышленных и коммунальных отходов.

Мониторинг нарушенных территорий, проводимый сотрудниками лаборатории рекультивации почв ИПА СО РАН в 2010-2011 гг. показал, что расположенные на территории Междуреченского муниципального образования группировка угольных разрезов, шахты и предприятия золотодобычи занимают площадь свыше 6 тыс. га. Общая площадь нарушенных земель, которые утратили природные свойства лесных земель и хозяйственную ценность для лесного хозяйства, превышает 14 тыс. га. В настоящее время такие деградированные территории являются источником негативного воздействия на окружающую среду региона, которое распространяется далеко за пределы горных и земельных отводов угледобывающих и других предприятий (категория земель – земли промышленности).

На территории муниципального образования «Междуреченский городской округ» добычу и переработку полезных ископаемых осуществляют 19 промышленных предприятий, из них: 6 шахт (каменный уголь), 5 разрезов (каменный уголь), 5 обогатительных фабрик (каменный уголь), 2 старательские артели по добыче золота, 1 предприятие по добыче талька. По информации, предоставленной Междуреченским комитетом по охране окружающей среды и природопользованию на 01.01.2010 г. общая площадь земель, занятых предприятиями горнодобывающей промышленности составляет 13,352 тыс. га (в основном в пределах городской черты общей площадью 33,5 тыс. га); а общая площадь нарушенных горными работами земель, занятых внешними отвалами, отстойниками, траншеями, котлованам и карьерными выемками, транспортными и инженерными коммуникациями угольных разрезов – 5,973 тыс. га.

Следует отметить, что угледобывающие предприятия Кемеровской области, в том числе и города Междуреченска, не являются образцом в рациональном использовании земель, в формировании отвалов вскрышных пород согласно утвержденным проектам отвалов и действующим техническим регламентам, а также в своевременной рекультивации нарушенных земель.

Добыча каждого миллиона тонн угля в городе Междуреченске (27,5-28,7 млн. тонн в год) сопровождается потерей земельных ресурсов лесного назначения площадью 3-4 га ежегодно (по Кемеровской области этот условный показатель составляет порядка 15 га в год потерь лучших лесных и пахотных угодий). При добыче золота этот показатель еще более катастрофичен (на 1 кг х.ч. золота нарушается 1 га лесных земель, которые чаще всего расположены в узких долинах горных рек и несут статус земель водозащитного и склонозащитного назначения) [4].

В горно-таежном поясе Кузбасса, в котором расположен г. Междуреченск, основными типами нарушенных земель являются: карьерные выемки и сопутствующие им внутренние и внешние породные отвалы, формирующиеся при открытой добыче угля; поверхности с преобладанием провальных форм рельефа, возникающие при подземной шахтной добыче угля; гидроотвалы, отстойники и навалы кека обогатительных фабрик.

Стоит отметить, что фактическая площадь нарушенных земель гораздо больше, поскольку в государственных статистических сведениях не учитываются земли:

- 1) не показанные в документации ведомственного производственного земельного контроля, которые представляют собой ранее отработанные, нарушенные и загрязненные земли промышленности (отстойники карьерных вод и т.п.);
- 2) с некачественно проведенной рекультивацией;
- 3) занятые свалками производственных отходов;
- 4) подработанные шахтами земли без видимых провалов, трещин и воронок на поверхности, а также с нарушенным гидрогеологическим режимом, с погибшей растительностью;
- 5) ликвидированных и закрытых добывающих предприятий;
- 6) содержащие искажение сведений о выполненных объемах работ (акты выполненных работ) и фактическим состоянием нарушенных земель.

Все вышеуказанное говорит о повсеместном нарушении горнодобывающими предприятиями проектов земельных отводов.

Восстановление естественных лесных экосистем – процесс очень долгий. По заключениям специалистов экосистема среднегорных хвойных лесов сможет самостоятельно восстановиться полностью в лучшем случае лишь через 250-300 лет [2]. Поэтому, для приведения нарушенных земель в состояние, пригодное для дальнейшего использования, угледобывающими предприятиями должны выполняться рекультивационные работы, которые являются основными мероприятиями по охране земель в составе природоохранных мероприятий, осуществляемых угледобывающими предприятиями, не менее важными, чем охрана водных ресурсов и охрана атмосферного воздуха.

Под современной рекультивацией подразумевается восстановление не только почв, но и биогеоценоза в целом, чему способствует набор технологических приемов. Данный набор позволяет сформировать на месте нарушенных земель участки территории с заданными в виде технического задания в рабочем проекте рекультивации параметрами хозяйственной и/или почвенно-экологической эффективности [3].

В 2009 году промышленными предприятиями, расположенными на территории Междуреченского муниципального округа, было выполнено работ по биологической рекультивации на ранее нарушенных землях площадью 85,0 га (в 2008 г. – 93,5 га, в 2007 г. – 81,0 га, в 2006 г.– 44,1 га; в 2005 г. – 69,5 га) [4].

Однако данный вид рекультивации дает низкий почвенно-экологический эффект. И в этом находится много причин. Одна из основных – неселективное отвалообразование, в результате которого в отвал попадают не только вмещающие, но и вскрышные породы (тяжелые суглинки и покровные глины), а также потенциально плодородные почвы. То есть отмечается несоблюдение технологии рекультивации с самого начала проведения горных работ.

Для проведения рекультивации нарушенных земель с высоким почвенно-экологическим эффектом необходимо в первую очередь:

1. Соблюдать и реализовывать технологию, заложенную в рабочем проекте рекультивации.
2. При составлении ТЭО-обоснования и проектов рекультивации необходимо предусматривать проведение предпроектных исследовательских работ по оценке индивидуальной специфики объекта рекультивации с целью подготовки нескольких способов рекультивации с количественным определением почвенно-экологической эффективности каждого способа.
3. Перейти на принятую во всем мире систему дифференцированной ответственности за принятие решений при разработке проектов рекультивации [3].

В связи с увеличением техногенной нагрузки на естественные ландшафты с каждым годом все острее поднимаются вопросы о защите естественных территорий, мониторинге окружающей среды, а также о рекультивации уже нарушенных ландшафтов. Поэтому изучение особенностей развития почвенного покрова техногенных ландшафтов, выявление индикаторов, показывающих направленность почвообразовательных процессов, является актуальным, оно позволит сделать прогноз развития нарушенных территорий. Данный прогноз поможет в выборе методов рекультивации, которые будут способствовать возвращению нарушенных земель в народнохозяйственное пользование, при условии соблюдения технологии рекультивации.

В посттехногенный период развития растительного и почвенного покрова, при проведении рекультивации или в результате естественного восстановления нарушенных земель формируется специфический почвенный покров. В составе развивающегося почвенного покрова, согласно классификации, разработанной сотрудниками лаборатории рекультивации почв Института почвоведения и агрохимии Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), преобладают четыре основных типа эмбриоземов: инициальные, органо-аккумулятивные, дерновые и гумусово-аккумулятивные [5].

Эмбриоземы инициальные – эволюционно молодой тип почвоподобных тел, морфологическим признаком которых является отсутствие биогенного горизонта. Примитивность профиля данного типа обусловлена недостаточной интенсивностью преобразования субстрата, составляющего отвал, вследствие отсутствия или слабого развития на его поверхности биоценозов. На эмбриоземах инициальных формируется биогеоценоз с пионерной растительностью. Длительность пионерной стадии развития растительной группировки зависит от свойств субстрата отвала и его рельефа. При неблагоприятных условиях почвообразования (высокая каменистость, фитотоксичность, кислотность субстрата отвала, инсоляция поверхности и др.) пионерная группировка может сохраняться долго. При благоприятных условиях почвообразования увеличивается число видов растений, усиливается мозаичность почвенного покрова. Длительность преобразования пионерных растительных группировок в более зрелые составляет от 2 до 10 лет [1]. Если за это время преобразования не произошло, то можно утверждать, что развитие почв и биогеоценоза в целом остановится на инициальной стадии.

Эмбриоземы органо-аккумулятивные – следующая стадия развития молодых почвенных образований техногенных ландшафтов. В данном типе эмбриоземов профиль еще не дифференцирован, но на поверхности формирующейся молодой почвы уже присутствует типодиагностический горизонт, представляющий собой слой неразложившейся подстилки. Гумификация аккумулярованных растительных остатков ограничивается незначительным количеством организмов-деструкторов. В связи со сменой сукцессии, меняется биогеоценоз – формируется экосистема с простой растительностью на эмбриоземах органо-аккумулятивных. Длительность существования простой растительной группировки,

как и на инициальной стадии, зависит, в основном, от таких факторов почвообразования, как породы, рельеф и продолжается от 4 до 8 лет, затем группировка эволюционирует в более сложную. В зависимости от природно-климатических и почвенно-экологических условий, если к 8-летнему возрасту техногенного ландшафта смена сукцессии и переход в более сложную стадию не произошли, то развитие эмбриоземов и биогеоценоза в целом остановиться на органо-аккумулятивной стадии. Если же смена сукцессии произошла, то формируется эмбриозем дерновый.

В эмбриоземах дерновых уже наблюдается профильная дифференциация минерального субстрата, которая диагностируется по биогенному горизонту A_d , представляющим собой дернину. При его возникновении начинается активное преобразование физических и химических свойств субстрата. В связи со сменой сукцессии, происходит смена биогеоценоза. Наступает стадия развития экосистемы со сложной растительностью на эмбриоземах дерновых. Сложные растительные сообщества могут сохраняться в техногенных ландшафтах Кузбасса, особенно в горно-таежном поясе, 30 и более лет [1]. В горно-таежном поясе сложные фитоценозы постепенно заменяются с травянистой растительности на древесно-кустарниковую [6]. Таким образом, в результате сингенетического развития различных ценозов на этой стадии происходит усложнение дифференциации профиля эмбриоземов и появление генетического дернового горизонта.

Эмбриоземы гумусово-аккумулятивные – эволюционно наиболее развитые почвенные образования техногенных ландшафтов. Они обладают развитым профилем, в котором морфологически выделяются как дернина (горизонт A_d), так и гумусово-аккумулятивный горизонт (A_1), что свидетельствует о глубокой степени трансформации почвообразующего субстрата под воздействием процессов разложения и синтеза органического вещества. На эмбриоземах гумусово-аккумулятивных, в связи со сменой сукцессии, происходит смена стадии со сложной растительностью на стадию с замкнутой растительной группировкой. В соответствии с законами сингенетического развития, в период образования замкнутого сообщества формируется наиболее развитый тип эмбриоземов – гумусово-аккумулятивный, со сложным строением почвенного профиля. Появление эмбриоземов гумусово-аккумулятивных в техногенных ландшафтах горно-таежного пояса Кузбасса определяет начало квазистационарной фазы почвообразования в этой зоне.

Фоновые почвы горно-таежного пояса Кузбасса формируются на больших расчлененных водоразделах, которые хорошо дренируемы и покрыты толщей тяжелых суглинков, покровных глин (в этом случае происходит развитие дерново-глубокоподзолистых почв) и щебенистых отложений (в этом случае развиваются бурые таежные почвы). Почвообразование здесь происходит в условиях умеренно холодного континентального климата с высокими амплитудами колебаний температуры и выпадения осадков по сезонам года. Устойчивый снежный покров защищает почву от глубокого и длительного промерзания, что усиливает и удлиняет период активности биологических, биохимических и других процессов в почве. Большое количество тепла и влаги при коротком вегетационном периоде способствует развитию мощного травяного покрова, дающего большое количество зольных элементов. Образование подстилки не происходит, так как обильный опад растительности почти полностью разлагается активными микробо – и зооценозами. Все это определяет специфику протекающих здесь почвенных процессов.

Оценивая почвенно-экологическое состояние, или, другими словами, почвенное здоровье, необходимо вообразить произвольную виртуальную шкалу, в которой имеется 100 делений. При оценке зональных почв в каждом случае показания «шкалы» составляет определенное значение, которое является зональным эталоном. Мера приближения техногенного ландшафта по определенным параметрам к фоновому эталону – есть некоторое значение, стремящееся к 100. Различия между ними характеризует экоклин, так как он отличается от естественного ландшафта. Это происходит потому, что фоновая почва сформировалась за определенный исторический промежуток времени по совокупному воздействию всех факторов почвообразования, и она находится в динамичном равновесии (квазистационарном состоянии). Техногенный ландшафт не находится в этом состоянии. Для того чтобы приблизиться к равновесию, необходимо большое количество времени, которым мы не располагаем. Поэтому техногенный ландшафт всегда, или достаточно долго, будет являться эоклином, отличающимся от естественного ландшафта на некоторое количество делений виртуальной шкалы, которые можно назвать «степенью приближения к зональной почве».

В горно-таежном поясе присутствует 2 эталона, 2 типа фоновой почвы естественных ландшафтов, которые брались за 100 делений – это бурые таежные почвы, сформированные на щебнистых отложениях и дерново-глубокоподзолистые, которые сформировались на тяжелых суглинках и покровных глинах. В качестве идеальных условий для горно-таежного пояса определяются не бурые таежные, а дерново-глубокоподзолистые, так как они сформированы на тяжелопокровных глинах и суглинках, а не на щебнистых отложениях. Почему это затрагивает внимание? Дело в том, что при рекультивации нарушенных земель некоторые руководители местного значения уверены в том, что на подготовленную поверхность ландшафта можно не вносить никаких суглинков, а просто распахать субстрат и все будет расти само собой, а затраты при этом останутся минимальными. Приводятся доводы о том, что в других местах, при якобы идентичных условиях, где нет никаких суглинков, все растет и развивается, что действительно так и есть. Но каждый ландшафт, каждая почва этого ландшафта

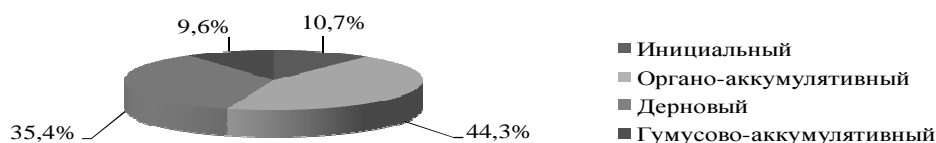
является естественноисторическим образованием, где происходят такие процессы, как внутрипочвенное выветривание и масса других, которые делятся тысячи лет и более.

Для достижения некоторой экологической эффективности необходимо понимание того, что, если не будет нормальной почвы, то не будет ни растительного покрова, ни микробсообщества, ни зооценоза. Вместо дерново-глубокоподзолистых почв превалировать будут бурые таежные. Но это менее эффективно для развития ландшафта. Необходимо чтобы формировались почвы, которые обладали бы большим числом экологических функций, наибольшим потенциальным плодородием, наибольшей продуктивностью. В горно-таежном поясе Кузбасса такими качествами как раз обладают только дерново-глубокоподзолистые почвы на тяжелосуглинистых покровных глинах. Хотя значение бурых таежных почв несколько не принижается.

Развитие эмбриоземов в горно-таежном поясе Кузбасса протекает поэтапно: инициальные – органо-аккумулятивные – дерновые – гумусово-аккумулятивные. Исходя из качества рельефа и почвообразующих пород, к 37-летнему возрасту ландшафта при благоприятных условиях происходит образование эмбриоземов гумусово-аккумулятивных, свойства которых наиболее сходны со свойствами бурых таежных почв. К этому времени вырастают самосевные кустарники и деревья. Учитывая факторы почвообразования, предполагается, что эволюция почв техногенных ландшафтов горно-таежного пояса идет в сторону образования бурых таежных почв. Однако, в зависимости от экспозиции (высокая степень инсоляции и др.) и крутизны склонов (смыв мелкозема и др.) отвалов, а также других неблагоприятных условий почвообразования, эмбриоземы даже за этот период времени могут оставаться на инициальной стадии и, скорее всего, ими останутся на неопределенно долгое время, пока не изменятся условия почвообразования. Следующая, органо-аккумулятивная стадия эмбриоземов тоже может остановить свое развитие и находиться в квазистационарном состоянии, так как под пологом древесной и кустарниковой растительности в техногенных ландшафтах горно-таежного пояса травянистый покров развит слабо, дернина не образуется. Данная стадия может деградировать до инициальной на некоторый промежуток времени, вследствие неблагоприятных условий (пожар, выпадение растений и результате болезней, несанкционированных порубок и т.п.). Затем на этих участках будет происходить интенсивное заселение травянистой растительностью, и в течение 8 -10 лет (со сменами сукцессий), образование дернины, и вследствие этого эмбриоземов дерновых с дальнейшим переходом в гумусово-аккумулятивные.

Таким образом, сходство техногенных ландшафтов Кузбасса выражено практически одинаковым составом почвенного покрова в различных биоклиматических зонах, которое проявляется в одинаковом наборе типов эмбриоземов. Это обусловлено тем, что эмбриоземы, будучи молодыми биогенными почвенными образованиями, являются сингенетическим отражением той или иной стадии сукцессии фитоценозов, а стадии сукцессий во всех ландшафтах одинаковы: 1) пионерная растительная группировка; 2) простая растительная группировка; 3) сложная растительная группировка; 4) замкнутый фитоценоз [1].

Мониторинг техногенных ландшафтов позволил определить площади разных типов эмбриоземов, входящих в состав почвенного покрова. В почвенном покрове ландшафтов горно-таежного пояса доля эмбриоземов органо-аккумулятивных составляет 44,3 %, а инициальных 10,7 % (рис.). Это связано с тем, что в данной зоне эмбриоземы инициальные эволюционируют до органо-аккумулятивных и задерживают дальнейшее свое развитие на этой стадии. В горно-таежном поясе эмбриоземы органо-аккумулятивные сформированы, как правило, в процессе естественного самозарастания древесными и кустарниковыми видами с участием лесного разнотравья. 45% почвенного покрова представлено эмбриоземами дерновыми и гумусово-аккумулятивными.



Процентное соотношение эмбриоземов техногенных ландшафтов горно-таежного пояса Кузбасса.

Таким образом, и фоновые почвы, и эмбриоземы техногенных ландшафтов горно-таежного пояса Кузбасса являются естественноисторическими образованиями, генетические и географические признаки которых должны определяться в соответствии с особенностями зональных факторов почвообразования. Зональная дифференциация состава почвенного покрова техногенных ландшафтов выражена отчетливо и не повторяет таковую естественных ландшафтов. 4 типа эмбриоземов отражают важные этапы почвообразования в техногенном ландшафте. Чем больше в составе почвенного покрова техногенного ландшафта эмбриоземов дерновых и гумусово-аккумулятивных, тем лучше почвенно-экологическое состояние ландшафта. Чем выше процент эмбриоземов инициальных и органо-аккумулятивных, тем хуже почвенно-экологическое состояние.

Выводы:

1. Мониторинг территории Междуреченского городского округа, расположенного в горно-таежном поясе Кузбасса выявил значительные, порой необратимые, изменения природных экосистем. Почвенно-экологическое состояние в горно-таежном поясе Кузбасса оценивается как удовлетворительное.
2. Эмбриоземы техногенных ландшафтов горно-таежного пояса Кузбасса являются азональными образованиями. Наиболее эволюционно развитые эмбриоземы гумусово-аккумулятивные находятся в квазистационарной фазе развития. Азональность эмбриоземов приводит к появлению новых экосистем с рядом отличий от зональных, что позволяет считать техногенные ландшафты Кузбасса экоклином.
3. Так как биотические и абиотические процессы развиваются в направлении устойчивых в данной природно-климатической зоне образований, то есть стремятся к зональному типу, то в этом же направлении происходит развитие эмбриоземов техногенных ландшафтов. Однако, в результате влияния литогенных и техногенных факторов, эмбриоземы техногенных ландшафтов в различных природно-климатических зонах Кузбасса имеют присущие только им характерные особенности.

Литература

1. Андроханов В.А., Куляпина Е.Д., Курачев В.М. Почвы техногенных ландшафтов: генезис и эволюция. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 151 с.
2. Баранник Л.П., Кандрашин Е.Р. Лесообразование на породных отвалах угольных разрезов Южного Кузбасса // Почвообразование в техногенных ландшафтах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1979. С. 172-179.
3. Гаджиев И.М., Курачев В.М., Андроханов В.А. Стратегия и перспективы решения проблем рекультивации нарушенных земель. Новосибирск: ЦЭРИС, 2001. 37 с.
4. О состоянии и охране окружающей природной среды Кемеровской области в 2008 году // Отчет о состоянии окружающей природной среды г. Междуреченска. 2008. 54 с.
5. Курачев В.М., Андроханов В.А. Классификация почв техногенных ландшафтов // Сиб. экол. журн. 2002. № 3. С. 255–261.
6. Экология и рекультивация техногенных ландшафтов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1992. 305 с.

Методы выявления пространственного группирования землетрясений при сейсмо-геодинамических исследованиях в информационной системе GIS-EEDB

П.Г. Дядьков¹, Ан.Г. Марчук¹, А.В. Михеева²

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики, Новосибирск

Описание компьютерной геоинформационной системы GIS-EEDB

Несмотря на то, что сегодня известно множество программ и алгоритмов комплексного исследования сейсмогеодинамического процесса, информационное обеспечение этих программ неполно [1-7]. Не в полной мере используются возможности ГИС-технологий, которые формируют основу картографо-геоинформационного подхода к исследованию сейсмологической информации [3-6]. Недостаточно полно используются инструментальные объектно-ориентированные программные среды, являющиеся удобным и эффективным средством разработки дружественного системного интерфейса. Отсутствие на данный момент достаточно универсального программного обеспечения и надежных характеристик для изучения процессов подготовки землетрясений, а также невозможность использования имеющегося программного обеспечения для решения специализированных задач по изучению сейсмогеодинамического режима южных районов Сибири и центральной Азии заставило нас начать работу по созданию собственной, более актуальной системы исследования сейсмогеодинамического процесса. К настоящему времени данная система создана и функционирует в одной из лабораторий института ИНГГ, позволяя проводить коллективные многоплановые и разномасштабные исследования в этой области.

Логическая структура GIS-EEDB представляет собой совокупность взаимодействующих между собой программных блоков: сейсмологической базы данных, географической подсистемы и подсистемы анализа данных (рис. 1), объединенных интерфейсной частью. Подобную структуру имели и предшествующие GIS-EEDB экспертные системы, разработанные ранее в применении к другим задачам, в частности, по проблеме цунами в Тихом океане [8,9].

Интерфейсная часть системы претерпела значительные изменения в процессе разработки системы: от функционирующей в среде MS-DOS и созданной средствами Turbo-Pascal графической оболочки, ограниченной разрешающими способностями графических адаптеров EGA и VGA, до отвечающей современным стандартам Windows системы меню и диалоговых окон, создаваемой средствами библиотеки MFC. Среда, образуемая классами этой библиотеки, определяет скелет разрабатываемого приложения и обеспечивает разработчика стандартными средствами для создания многооконного интерфейса.

Подсистема сейсмологическая БД

Подсистема сейсмологическая БД – это информационная модель описываемой системы, включающая в качестве своих элементов постоянно пополняемые инструментальные каталоги землетрясений и набор сопутствующих данных об их механизмах. Архивный вариант сейсмологической базы данных поддерживается стандартной СУБД в виде реляционной модели данных. Их архивного варианта данные преобразовываются в бинарные файлы и используются подсистемой GIS-EEDB для заполнения соответствующей структуры в динамически распределяемой памяти. В среде GIS-EEDB возможен доступ к нескольким десяткам каталогов исторических и современных землетрясений, приведенных к единому формату [10], среди которых не только традиционные, но и авторские каталоги, являющиеся объединенными и очищенными от дублей наборами данных из различных источников. Это каталоги мирового масштаба: NEIC (с 1973 г. по сей день, $\sim 586 \cdot 10^3$ записи), SIGN (с -2000 по 1993, $\sim 6.5 \cdot 10^3$ записи с $M > 4$) американской геофизической службы USGS и другие, а также каталоги регионального масштаба: объединенный Байкальский (по материалам Байкальского филиала Геофизической службы РАН и другим источникам, $\sim 165 \cdot 10^3$ записи), каталог Алтая (Алтае-Саянского филиала ГС СО РАН, $\sim 32 \cdot 10^3$ записи) и т.д.

В программный блок системы управления сейсмологической базой данных включена *первичная обработка исходных каталогов*, заключающаяся в выборе текущего каталога и последующей выборке подмножества землетрясений по параметрам запроса: диапазону времени, магнитуд, пространственному диапазону и т.д. Дальнейшая подготовка данных к исследованию предполагает очищение выбранной части каталога от афтершоков и роев, чему служит отдельная функция, реализующая три метода выделения афтершоков по выбору пользователя. Первый метод, условно названный *эмпирическим*, основан на параметрах времени и расстояния афтершокового события от главного толчка (dT и dS), зависимость которых от величины главного толчка получена авторами эмпирическим путем. Второй (*эллиптический*) метод основан на алгоритме Прозорова [11], *модифицированном* следующим образом: все выделяемые афтершоковые последовательности ведутся параллельно за один проход каталога (рис.2), минимальный размер прямоугольной метрики задается интерактивно, кроме того, в отличие от классического варианта (рис. 3в) расчета эллиптических метрик, предложено построение эллипса равной

вероятности (рис. 3а). Третий метод назван *интерактивным* - значения dT и dS задаются пользователем. Рассмотрим подробнее результаты работы второго (наиболее используемого) метода (рис. 3).

Эллиптический метод предполагает задание следующих параметров: порог сигнал/шум R_s/n , минимальная магнитуда главного толчка, минимальная магнитуда афтершоков, минимальный размер прямоугольной метрики и т.д. и включает в себя этапы, описанные нами ранее [10]. *Классический* вариант нахождения параметров эллипса [11] возможен без учета и с учетом веса, который определяется по числу событий, попавших в ячейку. Учет веса имеет смысл в случаях большого рассеяния афтершокового облака по площади.

Практика показала, что в ряде случаев преимущество в выявлении афтершоков имеет предложенный нами метод, фиксирующий пространственную структуру распределения афтершоков с помощью эллипса равной вероятности:

$$\varphi(x,y) = \frac{1}{1-\rho_{12}^2} \left(\frac{x^2}{\sigma_1^2} - 2\rho_{12} \frac{xy}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{y^2}{\sigma_2^2} \right) = \text{const} = \lambda^2,$$

где $\lambda^2 \approx 2 \cdot \left(1 - \frac{1}{9} + 3.29 \cdot \frac{1}{3} \right)^3$ – аппроксимация квантилей для распределения с двумя степенями свободы при $P = 0.9995$; $\sigma_1^2 = DX$, $\sigma_2^2 = DY$ – дисперсии x и y , а ρ_{12} – коэффициент корреляции между x и y . Результат применения данной оценки параметров эллипса при выявлении афтершоков землетрясения 16.9.2003 в северной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) превзошел *классический* вариант как по числу выделенных событий (263 и 246 соответственно), так и по длительности афтершоковой последовательности (3,9 и 1,6 года, соответственно – рис. 3д).

Преимуществом *модифицированного* нами метода является также практическая независимость его результатов от порогового соотношения сигнал/шум R_s/n .

Сравнение эффективности описываемых алгоритмов удаления афтершоков из множества землетрясений проведено с помощью оценки статистических свойств получаемых множеств (рис.3е). Результаты сравнения работы *классического* и *модифицированного* алгоритмов показывают существенное отклонение наблюдаемого распределения событий от теоретической кривой распределения Пуассона для случайных величин [16] как до удаления афтершоков (1), так и после их удаления *классическим* методом (2). Это отклонение исчезает при удалении афтершоков *модифицированным* алгоритмом (3).

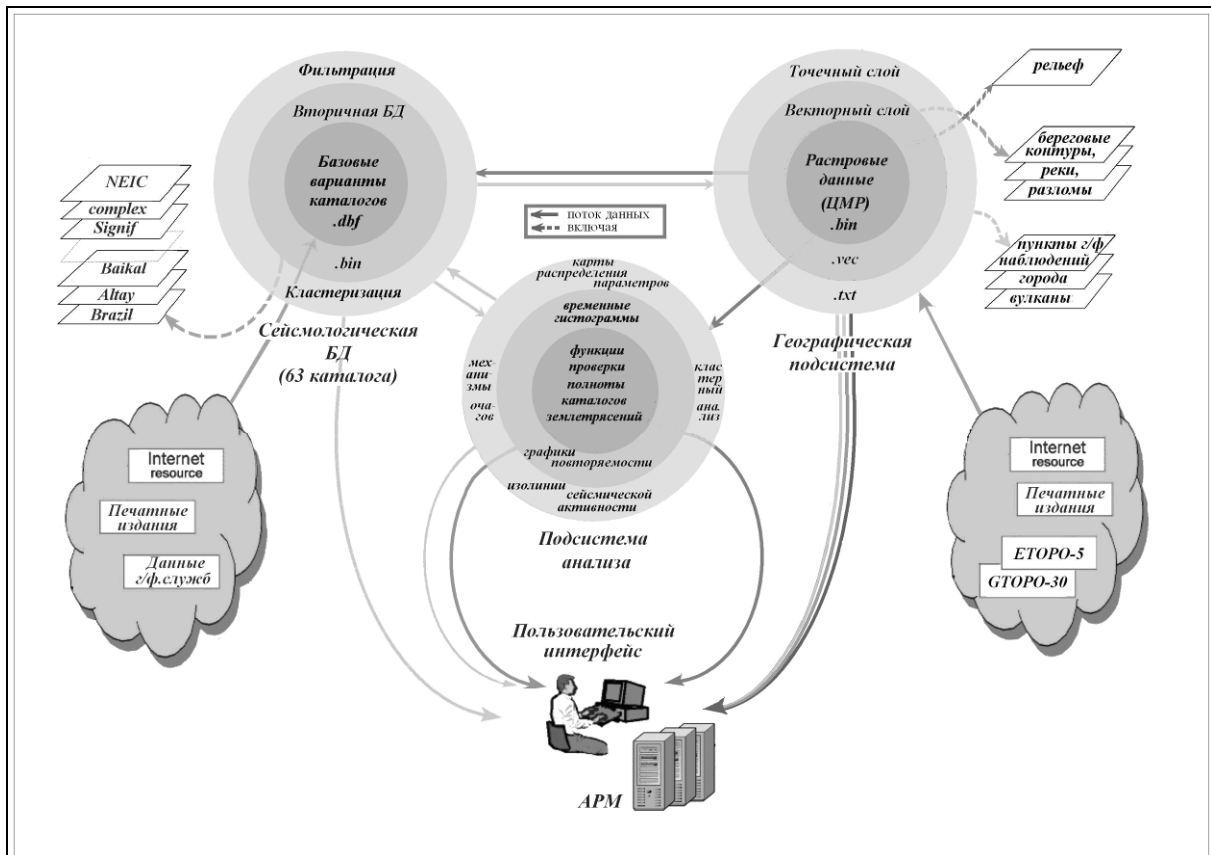


Рис. 1. Логическая структура программного обеспечения GIS-EEDB.

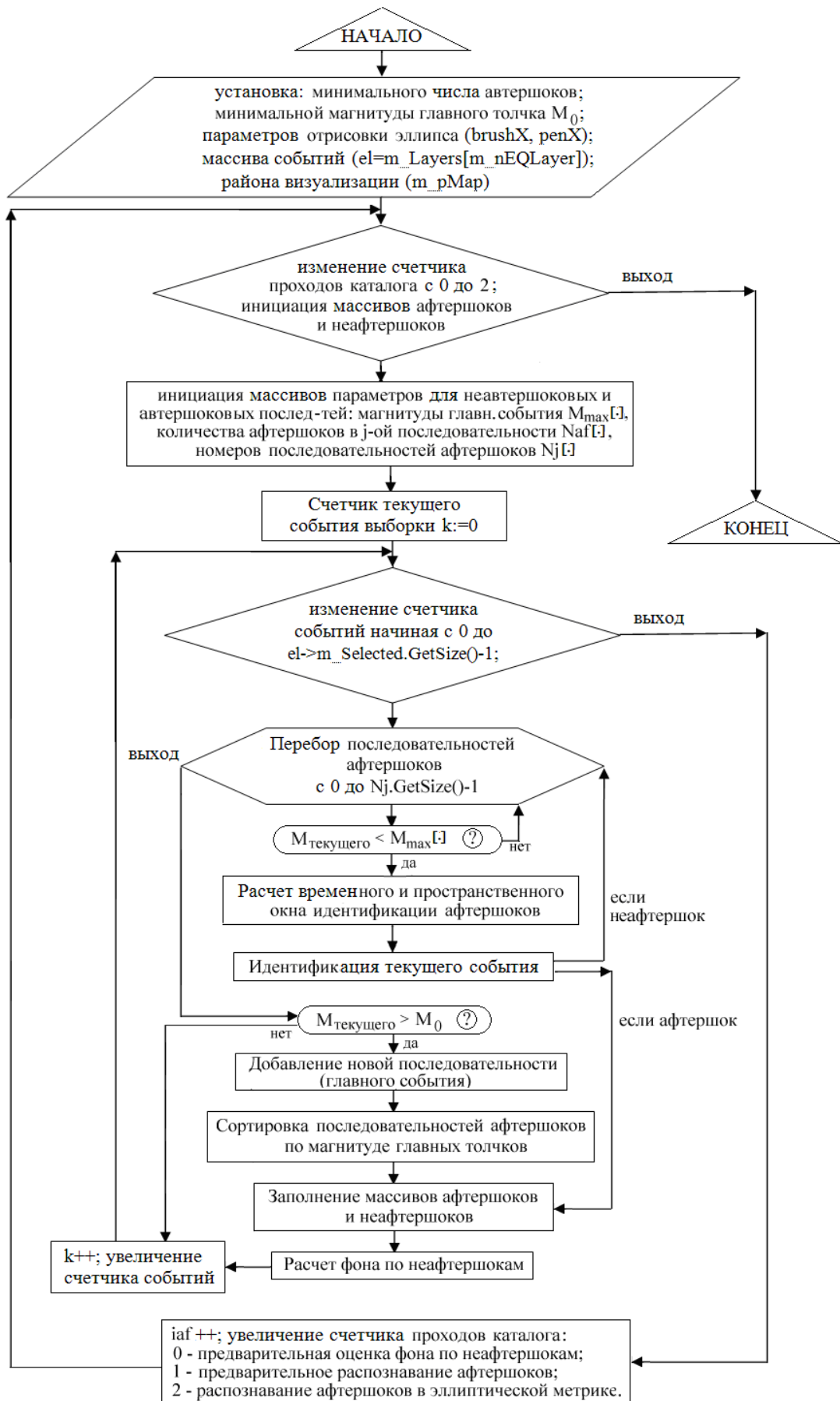


Рис. 2. Блок-схема модифицированного алгоритма выделения афтершоков.

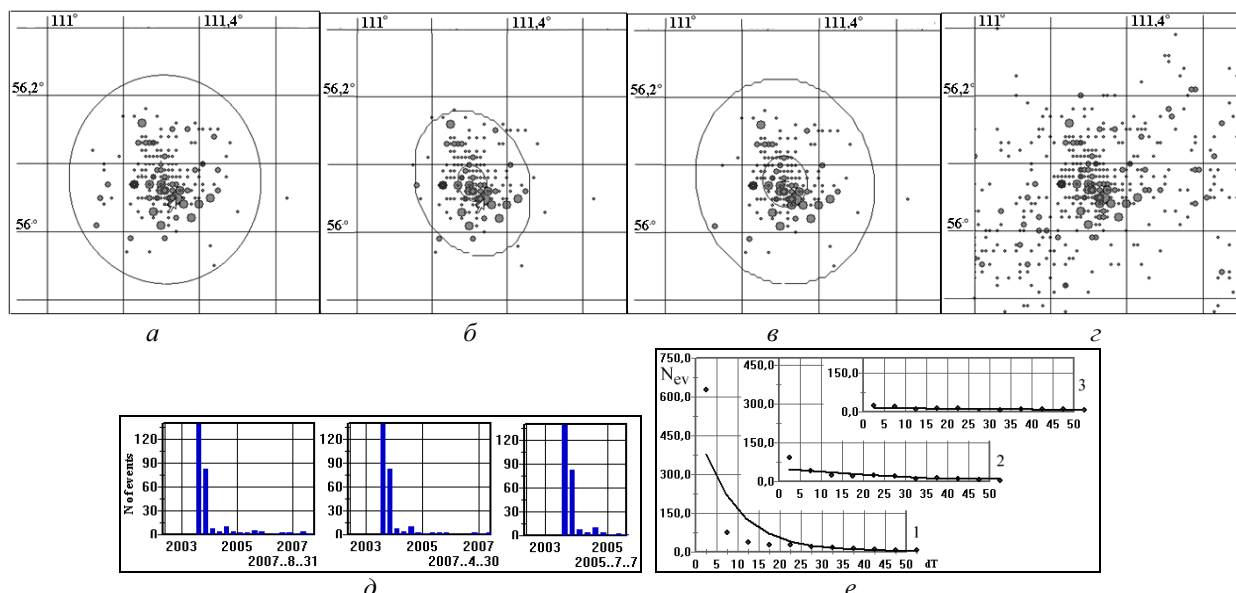


Рис. 3. Результаты вариантов расчета эллиптических метрик для выделения афтершоков на примере землетрясения в БРЗ 16.09.2003 ($M=5.8$): *a* – по доверительному эллипсису (равной вероятности), *б* – по среднеквадратичному отклонению [11] с весом, *в* – то же без веса, *з* – распределение событий до удаления афтершоков; *д* – распределение по времени афтершоков, выявленных эллипсами *a*, *б* и *в* ($R_{s/m}=15$); *e* – отклонение наблюдаемого числа землетрясений ($M \geq 1.5$ с 1987 г.) от теоретической кривой распределения Пуассона до (1) и после (2-3) удаления афтершоков толчка 13.05.1989, $M=5.8$.

Географическая подсистема

Географическая подсистема является важной частью системы GIS-EEDB. Использование методов цифровой картографии и соответствующих ГИС-технологии позволило создать удобный картографический планшет для визуализации сейсмологических данных на основе различных форматов картографических данных: растровых, векторных и точечных. Для визуализации растровой информации используется метод цифровой картографии, заключающийся в тонировании (закрашивании оттенком оговоренного цвета) точек поверхности в зависимости от их яркости при боковом освещении поверхности. В первую очередь проводится триангуляция всей отображаемой области, при этом каждая прямоугольная ячейка сетки разбивается, как минимум на два треугольника (максимально на 16 треугольников). Число треугольников в разбиении зависит от того, насколько заказанный пользователем размер рисунка превышает размеры исходного массива. Освещенность каждого элемента поверхности (прямоугольника с вершинами в узлах сетки) определяется в соответствии с ориентацией плоскости каждого треугольника по отношению к вектору направленности освещения. В частности, в случае равенства размеров исходного массива и создаваемого графического образа вычисляется величина освещенности плоскости, проходящей через левую верхнюю, правую верхнюю и левую нижнюю вершины каждой из ячеек сетки. При изменении направления вектора освещенности разбиение ячеек будет другим.

Перечислим основные шаги алгоритма тонирования:

- 1) Поверхность разбивается на некоторое, вычисляемое из соотношения желаемого размера картинки и размерности массива количество треугольников, где по каждому треугольнику известны высоты всех вершин относительно некоторого уровня отсчета.
- 2) Для каждого из треугольников, находится векторное произведение векторов, являющихся сторонами этого треугольника.
- 3) Полученный вектор нормируется.
- 4) В зависимости от угла между получившимся вектором нормали и вектором освещенности 3-мерной сцены (обычно берется источник освещения с параллельными лучами) подсчитывается величина яркости освещения данного треугольника.
- 5) Из полученной яркости получаем градацию яркости соответствующего цвета, где цвет определяется высотой данной точки над уровнем моря и заданной пользователем цветовой схемой.
- 6) В соответствии с параметрами картинной плоскости рисуем 2-х мерную проекцию.

В литературе по 3-х мерной графике, для алгоритма, похожего на реализованный, используется название Guro Rendering (Гуро тонирование). Параметры освещения и базовые цвета, из которых затем получаются различные оттенки яркости, задаются пользователем. Для обеспечения возможности построения карт различных масштабов – от обзорной карты всего мира до карт отдельных регионов автоматически выбирается массив с оптимальным разрешением [12,10]. В настоящее время существует несколько глобальных банков данных, представляющих рельеф земной поверхности с различной

детальностью (например, [13]). В GIS-EEDB внедрены наиболее известные среди них GTOPO-30 и SRTM-90 с, соответственно, 30-секундной и 3-секундной сетками данных. Затем на растровое изображение накладываются векторные и точечные слои, а также текстовые пояснения.

Подсистема анализа данных

Этот программный блок включает в себя алгоритмы решения задач геоинформационного анализа, опирающиеся на основные авторские разработки и работы ведущих современных исследователей сейсмогеодинамического процесса с использованием каталогов землетрясений.

Первый слой подсистемы (рис. 1) составляют процедуры проверки полноты и качества каталогов землетрясений [10,14]. Следующий слой связан с визуальным анализом комплекса сейсмических характеристик и состоит из двух подуровней: графического и картографического [10]. Основные характеристики сейсмопроцесса, [10,17] для которых производится расчет графиков и картограмм – это: нормированная к фону суммарная сейсмическая энергия ($Ig E_{ср}/E_{ф}$), величина наклона графика повторяемости (параметр b), стабильность выделения энергии (по приращению плотности сейсмогенных разрывов $K_{ср}$ и среднеквадратичному отклонению выделенной энергии от нормы $Sigma$), различные варианты расчета сейсмической активности.

Изучение закономерностей пространственно-временного развития сейсмического процесса в контексте его приуроченности к основным тектоническим структурам или учет миграции событий во времени требуют разработки *кластерных* методов выявления групп событий, связанных в пространстве и в пространстве-времени. В отличие от описанных выше оконных методов выделения афтершоков в кластерных методах вводится понятие близости для пары событий, и эта близость может рассматриваться как по отношению к сильнейшему событию кластера, так и к наиболее позднему его событию. В последнем случае кластер представляет собой цепочку событий [15]. В системе GIS-EEDB реализован программный блок алгоритмов, реализующих несколько кластерных методов выявления связанных групп событий [10].

В дополнение к ним в систему добавлены *другие методы группирования землетрясений*. Так, для проверки их “связности” по времени предусмотрена возможность временной рандомизации множества событий с последующим сравнительным анализом реальных и синтетических данных. Другой метод выявления групп связан с распознаванием линейных образов по множеству точек плоского пространства. В основе метода лежит задание максимального шага и максимального угла отклонения для поиска следующей точки (эпицентра) цепочки событий сейсмоактивных границ. В результате работы алгоритма выявляется ряд реально существующих прямолинейных и искривленных тектонических структур.

Заключение

В данной статье система GIS-EEDB рассмотрена как программный продукт, представляющий категорию ГИС-систем, ведь именно необходимость привлечения географической базы при решении пространственных геодинамических задач явилась основным стимулом разработки данной системы в условиях отсутствия или недоступности такого рода систем на момент начала исследования. Поскольку программная система является также системой управления базами сейсмологических данных, кратко описывается содержание каталогов землетрясений. Приведены методы геопространственного анализа сейсмичности, в частности, предложены алгоритмы, позволяющие осуществлять группирование гипоцентров землетрясений в пространственном и пространственно-временном диапазонах. Выявление групп связанных событий необходимо как для построения детальных моделей земной коры – выделения сейсмоактивных границ блоков или отдельных разломов, так и для изучения сейсмического режима территорий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №10-05-01042-а, МИП СОРАН № 44, ИП СОРАН № 61, проекта 4-8 Программы Президиума РАН № 4.

Литература

1. Гитис и др. ГЕО – экспертная система для геолого-геофизического прогноза // Экспертные системы: состояние и перспективы. М.: Наука, 1989. С. 119-130.
2. Маринин И.В. Елецкий С.В., Чесноков В.В. Использование Imp.Itris для предварительного и оперативного исследования цунами и оценки их последствий // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Издательство МГГУ, 2009. Т. 18, № 12. С. 181-185.
3. Ален К.А. и др. Комплекс долгосрочных сейсмологических предвестников (Калифорния и некоторые другие регионы) // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 19: Математические методы в сейсмологии и геодинамике. С. 23-36.
4. Вебер К. и др. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XII. Неотектоническая схема западных Альп. $M > 5.0$ // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 19: Математические методы в сейсмологии и геодинамике. С. 23-36.
5. Макеев А.М., Кролевец А.Н. Эффективная компьютерная программа поиска плоскостей группирования гипоцентров землетрясений Камчатской сейсмоактивной зоны // Тез. докл. Второй региональной научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического

- мониторинга Дальнего Востока России». Петропавловск-Камчатский, 11-17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский, 2009. 167 с.
6. Костоусов В.Б., Кронроп Т.Л., Писаренко В.Ф. Фрактальное моделирование пространственного распределения землетрясений // Вычислительная сейсмология. 1996. Вып. 28: Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. С. 175-192.
 7. Ружич В.В., Левина Е.А., Востриков В.И. Использование опыта среднесрочного прогноза землетрясений в Прибайкалье для борьбы с горными ударами // Материалы конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». Новосибирск, 2-5 октября 2007 г. Новосибирск, 2007. С. 407-413.
 8. Gusyakov V.K., Marchuk An.G., Osipova (Mikheeva) A.V. Expert tsunami database for the Pacific: motivation, design and proof-of-concept demonstration region // Perspectives on Tsunami Hazard Reduction: Observation, Theory and Planning, G.Hebenstreit, (Editor). Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, 1997. P. 21-34.
 9. Ivaikin D.V., Ivaikin D.V., Marchuk An.G. A simple windows-based geographic mapping system for visualization and analysis of seismic and tsunami data // Proceedings of the 1999 Conference on the application of remote sensing and GIS for disaster management, NASA-FEMA-GWU. Washington, USA, January 19-21, 1999. Washington, DC, USA, George Washington University, 1999. 1 CD-ROM. Track 4.
 10. Djadkov P.G., Mikheeva A.V. The EEDB - Expert Earthquake Database for Seismic-Geodynamic Research // Bulletins of the Novosibirsk ICMMG. Mathematical Modeling in Geophysics. 2010. N. 13. P. 15-30.
 11. Прозоров А.Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений // Вычислительная сейсмология. 1986. Вып. 19: Математические методы в сейсмологии и геодинамике. С. 58-62.
 12. Марчук Ан.Г. Способы создания цифровой батиметрии для численного моделирования // Тр. ИВМиМГ. Мат. модел. в геофизике. Вып. 5. Новосибирск, 1998. С. 152-160.
 13. Smith W.H.F., Sandwell D.T. Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry and Ship Depth Soundings // Science. 1997. Vol. 26, N 277. P. 111.
 14. Gusyakov V.K., Marchuk An.G., Osipova (Mikheeva) A.V. Expert tsunami database for the Kuril-Kamchatka region // Bulletin of the NCC. Mathematical Modeling in Geophysics. Novosibirsk: NCC Publisher, 1994. N 1. P. 65-77.
 15. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24: Современные методы интерпретации сейсмологических данных. С. 19-50.
 16. Ebel J.E., Kafka A.L. A non-Poissonian element in the seismicity of the Northeastern United States // Bull. Seism. Soc. Amer. 2002. Vol. 92, N 5. P. 2040-2046.
 17. Дядьков П.Г., Михеева А.В. Геоинформационно-экспертные методы анализа сейсмологических данных // Тр. конф. «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ'10). М., 2010. С. 430-437.

Разработка методов сбора отходов производства и потребления

В.И. Егоров

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул

Решение проблемы ТБО является важной проблемой муниципальных образований. В настоящее время актуальной является проблема сбора и транспортировки отходов производства и потребления. Существующие ныне системы разработаны десятки лет назад и нуждаются в модернизации. Проблемы транспортной оптимизации решаются с помощью использования логистических подходов.

В статье описан один из вариантов решения проблемы, в которой используется транспортная задача с разделением зон обслуживания на сектора.

Транспортная задача – задача об оптимальном решении плана перевозок, когда в системе участвует несколько потребителей и один или несколько поставщиков. Задача имеет несколько путей решения (итерационное улучшение плана, теория графов), однако все они сводятся к одному – найти наименьший путь между поставщиками и потребителями. Так же необходимо учитывать, что размер груза, который могут перевозить автомобиль, не всегда больше необходимого товара, доставляемого клиентам. Проще говоря, приходится делать несколько рейсов от склада поставщика до потребителей.

Теоретическое решение транспортной задачи, как правило, не может быть использовано в реальных условиях. Есть несколько аспектов, без которых ее применение не будет продуктивным:

- грузовые автомобили не всегда могут проложить путь по всем улицам города (ограничающие знаки дорожного движения), поэтому путь может оказаться и несколько большим, чем в теории;
- необходимо учитывать особенности городской застройки: жилые дома, пристройки, дворовые территории, улицы и т.д. Проложить путь можно только через улицы (проезды, проспекты и т.п.) и дворовые территории.

В связи с вышеизложенным становится понятно, что расстояние между двумя объектами в теории (т.е. на карте) и на практике, может отличаться в разы. Поэтому, считаем, что необходимо применение несколько иных методов к решению задачи.

Использование транспортной задачи в области обращения с отходами пока не слишком велико. Причин этому несколько, но основная из них заключается в нежелании что-либо менять в устоявшемся порядке работы. Век информационных технологий требует выдачу четкого плана каждому сотруднику, и отводит время для его выполнения.

Рассматривая логистическую деятельность предприятий по вывозу отходов как объект исследования, можно констатировать, что на текущий момент ситуация с транспортировкой у грузовых автомобилей, занимающимися сбором отходов – мусоровозами, неэффективна. Доставка на место захоронения – полигон, осуществляется без надлежащего плана и контроля. Что, в свою очередь, приводит к следующим негативным последствиям:

- увеличивается время сбора и доставки отходов на полигоны
- увеличивается проходимый мусоровозами маршрут, что приводит к увеличению затрат на ГСМ и амортизацию;
- отсутствует возможность выбора компонентов из отходов для переработки их во вторичное сырье;
- из-за малой эффективности сжатия отходов мусоровозами уменьшается количество отходов, поступающих на полигоны.

Решением данной проблемы может служить установка сортировочных станций на колесах. Данные станции практически не отличаются от уже привычных станций по сортировке бытовых отходов, и после переработки во вторичное использование будут возвращены такие материалы, как стекло, металл. Их проектная мощность составляет значительно меньше мусороперерабатывающих заводов, однако они обладают одним неоспоримым преимуществом: малые габариты и мобильность. Небольшие размеры позволят установить станции в городах, где трудно найти необходимое место под полноценную станцию, а мобильность позволяет перенести станцию на другое место в случае необходимости. Основная проблема реализации проектов по сортировке отходов – низкая развитость сети предприятий по переработке вторичного сырья, что ведет к увеличению сроков окупаемости проекта и их низкой инвестиционной привлекательности.

В связи с тем, что сортировочные станции на колесах имеют небольшую проектную мощность, для обеспечения нужд крупного города требуется совместная работа нескольких сортировочных станций. В случае поломки или временной неработоспособности одной из станций ее функции должны быть перенесены на другие станции.

Необходимо отметить, что количество таких станций зависит от их проектной мощности и от размера обслуживаемого пункта, который они обслуживают. В этом случае за каждой станцией будет закреплена определенная территория, находящаяся вблизи. Площадь территории у каждой станции будет различной, ведь отходы неравномерно образуются в разных районах города. Чем больше отходов вырабатывает тот или иной район, тем меньше площадь обслуживания сортировочной станции. Выбор количества станций

и распределения их зоны действия напрямую зависит от количества отходов, образуемых в том или ином районе, городе или пригороде.

Для определения площадки для установки сортировочных станций нам необходимо решить транспортную задачу.

Для начала необходимо нанести на карту города участки, в которых скапливается наибольшее количество отходов. Можно схематически изобразить распределение отходов: чем темнее цвет, тем больше отходов образуется на данном участке на единицу площади. В частном случае схема выглядит так, как показано на рис. 1.

Предварительный выбор месторасположения станций определяется вручную: наиболее приемлемым является вариант выбора в центре концентраций. После этого необходимо разделение участка города на зоны обслуживания, т.е. необходима граница, внутри которой участок должен принадлежать либо одной, либо другой станции.

Рассмотрим простой вариант с двумя станциями. Отметив места сортировочных станций (1 и 2 на рис.2), можно определить границы зон обслуживания этих пунктов, таким образом, чтобы количество отходов, принадлежащих каждой станции, было одинаковым. Кроме того, общая протяженность путей от мест сбора отхода до сортировочных станций также должна быть минимальной.

Очевидно, что выбор точек достаточно сложен, а решение задачи может быть сложным, отчего требует применения эвристики. Метод эвристики заключается в постепенном перемещении обеих точек, и, соответственно, изменении границы, а затем выбора наилучшего варианта [1].

Дальнейшая задача будет заключаться в сборе отходов с мест их складирования (мусорных баков), в рамках выбранных границ, и доставке к сортировочным станциям. В качестве примера возьмем мусоровозы вместимостью 10м^3 , обладающие двукратным сжатием отходов. Принимая во внимание, что количество отходов в одном месте - около 2м^3 (2-3 бака объемом $0,75\text{м}^3$), мы можем вместить не более 20м^3 отходов за один рейс в один мусоровоз. Количество рейсов R можно вычислить по формуле:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{M};$$

где w_i - количество отходов, образовавшееся на i -м пункте; n - количество пунктов, на которых складировются отходы от населения, организаций и предприятий; M - максимальная вместимость мусоровоза с учетом сжатия.

Однако на практике, ввиду неполной наполняемости мусоровозов, значение R оказывается несколько большим.

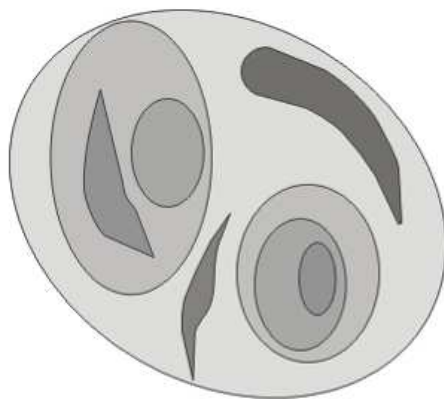


Рис. 1. Карта распределения отходов по территории.

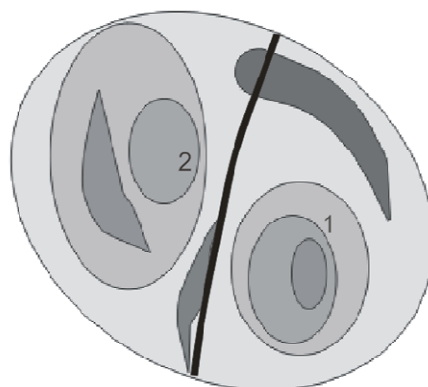


Рис. 2. Выбор границы зон обслуживания для двух сортировочных станций.

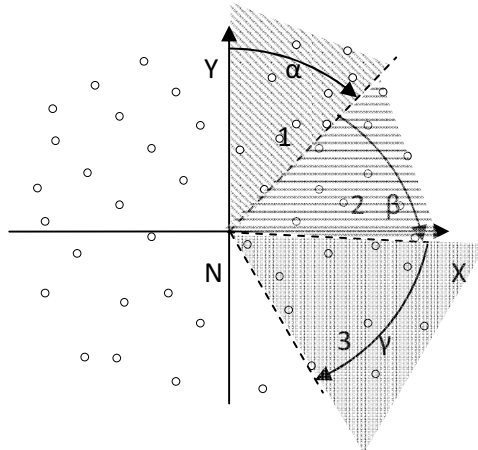


Рис. 3. Разделение зоны обслуживания сортировочной станции на сектора для прокладки маршрута.

Для сбора отходов w_i нам потребуется алгоритм, позволяющий это сделать с минимальными издержками.

Особенность нашей задачи заключается в том, что отходы собираются из начальной точки N (в начале которой мусоровоз является пустым), проходит через точки $A_1, B_1, C_1, D_1 \dots \in R_1$, после чего он полностью наполняется, и возвращается в исходную точку N, в которой расположена сортировочная станция. Затем мусоровоз из точки N идет по маршруту №2, состоящий из точек $A_2, B_2, C_2, D_2 \dots$, и, опять, полностью загрузившись, возвращается в точку N. Точки A_i, B_i, C_i, D_i являются маршрутом i -ого рейса.

Прежде, чем приступить прокладыванию маршрута между точками $A_i, B_i, C_i, D_i \dots$, принадлежащими определенному значению маршруту R_i , необходимо из всей зоны обслуживания мусоросортировочной станции выбрать точки, принадлежащие к маршруту при $i=1, i=2, i=3$ и т.д., то есть точки, принадлежащие первому, второму, третьему и т.д. маршруту.

Распишем порядок действий в качестве алгоритма

1. Нанесем координатную ось. Расположим точку N в начале координат.
2. Наносим на взятую ось все точки (баки для отходов), входящие в зону обслуживания взятой сортировочной станции.
3. Выберем сектор, одной из сторон которого является выбранная ось OY.
4. Примем вторую сторону сектора также параллельно оси OY.
5. Повернем одну из сторон сектора на некоторое количество градусов по часовой стрелке до того момента, пока хотя бы одна из точек не попадет в рассматриваемый сектор (это и будет точкой A_1).
6. Считаем количество (вес) отходов, находящихся в этом секторе: w_1

Очевидно, что на данном этапе w_1 равно количеству отходов на точке A_1 , т.к. на данный момент секторе w_1 находится только A_1 .

7. Если w_1 является допустимым для перевозки, то продолжаем.
8. Увеличиваем угол сектора до вхождения в него еще одной точки (B_1).
9. Считаем сумму отходов w_1 .

Теперь $w_1 = A_1 + B_1$.

10. Проверяем условие 6.

Если условие 6 выполняется, продолжаем по аналогии искать точки C_1, D_1, E_1 и т.д. до тех пор, пока вместимость мусоровоза не станет меньше, чем сумма отходов, находящаяся в секторе.

11. Ищем точки A_2, B_2, C_2, D_2 и т.д.

Начинаем новый сегмент, первая сторона которого равна второй стороне первого сегмента, и продолжаем алгоритм поиска, как для первого сектора.

12. Ищем точки для всего возможного количества сегментов.

Таким образом, получим значение n количества секторов

На этом основная часть алгоритма заканчивается. В нашем случае количественные характеристики углов α, β, γ и т.д. не так важны. Вполне вероятно, что последний сектор $i=n$ будет иметь слишком малым, то есть сумма количества отходов на последнем сегменте окажется вдвое меньше среднего значения по остальным сегментам. Эффективность такого рейса будет минимальна, поэтому стоит пересмотреть решение, а именно: п.4 следует с точки B_1 , а т. A_1 , в свою очередь, перейдет в последний сегмент $i=n$. Если условие опять не выполнится, то начинаем расчет с точки C_1, D_1, E_1 и т.д. до его выполнения. Расчет будем производить до момента, пока не закончатся точки, принадлежащие R_1 .

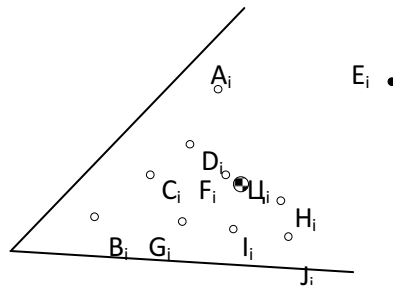


Рис. 4. Объекты внутри одного из секторов.

Таким образом, вся зона обслуживания сортировочной станции будет разделена на сектора, частный вид сектора показан на рис.4.

Нам необходимо соединить маршрутом из точки N все точки A_i, B_i, \dots, J_i и вернуться назад в точку N. В общем случае задача решается достаточно просто: достаточно постепенно соединять точки, близко расположенные к предыдущей точке. То есть, географически ближайшая точка к т. N – т. B_i , к т. B_i – т. C_i , и т.д. и до точки N. Именно в таком порядке мы и должны проложить свой маршрут. Однако возможен случай, в результате которого одна или несколько точек не будет задействованы.

Обратим внимание на точку E_i на рисунке 4: она расположена значительно дальше от центра точек C_i , в отличие от остальных точек. Велика вероятность, что она окажется не включенной в наш маршрут. В этом случае необходимо взять ближайшие к E_i точки, а ими являются A_i и H_i , и когда маршрут подойдет к одной из них, необходимо маршрут проложить через т. E_i . Т.е. маршрут изменится на следующую цепочку: $A_i \rightarrow E_i \rightarrow H_i$. Таким образом, все пункты сбора окажутся задействованными.

Немаловажен является и выбор направления движения мусоровоза. Согласно алгоритму, рис.4 превратится в схему движения на рис.5. Стрелками обозначено направление движения. Выбор обусловлен тем, что двигаясь по маршруту, мусоровоз потратит меньшее количество топлива. Однако, окончательное решение может измениться из-за городских условий.

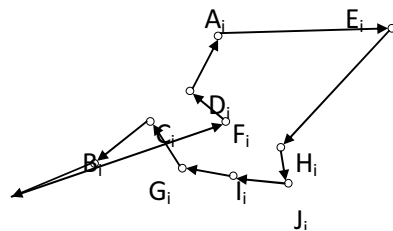


Рис. 5. Готовый вариант маршрута.

Как уже упоминалось выше, описанные методы не учитывают городскую планировку, поэтому для применения в реальных условиях существует необходимость прокладки путей для сбора отходов через улицы и дворовые территории.

В данном месте имеет место применение задачи коммивояжера (Travelling Salesman Problem, TSP), решение которой имеет несколько методов решения. В частности, один из них - алгоритмом муравьиной колонии, является эмпирическим, и требует многократного повторения алгоритма. Алгоритм описывает движение муравьев от начальной точки до объекта (еды).

Алгоритм выглядит следующим образом:

1. муравей проходит случайным образом от колонии до источника пищи;
2. после нахождения источника пищи, муравей возвращается в гнездо, оставляя за собой след из феромонов;
3. феромоны привлекают других муравьев, находящихся вблизи, которые вероятнее всего пойдут по этому маршруту;
4. вернувшись в гнездо они укрепят феромонную тропу;
5. если существует 2 маршрута, то за то же время по более короткому успеют пройти больше муравьев, чем по длинному;
6. короткий маршрут станет более привлекательным;
7. длинные пути, в конечном итоге, исчезнут из-за испарения феромонов.

Взяв вместо муравьев и еды мусоровоз и места складирования отходов, получим решение задачи. Ввиду затрудненности вычислений существуют программные реализации данного алгоритма, например TSP Solver for Google Maps API. Проект разработан под лицензией MIT, позволяет получить на картах маршруты оптимальной протяженности.

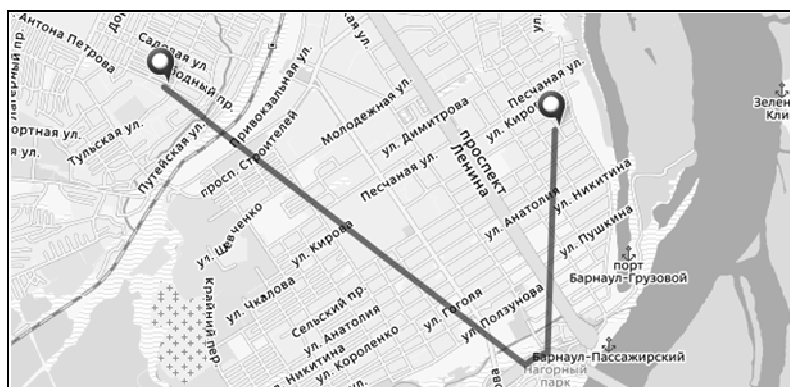


Рис. 6. Mail.Ru@Карты, г. Барнаул: оптимальный с точки зрения сайта маршрут между двумя точками.

Среди российских разработок можно выделить офф-лайн (ДубльГис) и он-лайн карты (Карты@Mail.Ru, Рамблер-Карты, Яндекс.Карты), способные прокладывать оптимальный путь, но только между двумя точками. Однако из-за ошибок в программной реализации предложенное такими сервисами решение не всегда соответствует ожиданиям. Например, на рис. 6 видно, что путь, отображенный с помощью сервиса Карты@Mail.Ru, построен некорректно. С нашей точки зрения, наиболее оптимальным выбором являются Яндекс.Карты, имеющие наибольшую функциональность и гибкость для разработчиков, однако на текущий момент в России прокладка маршрута действует только в Москве и Московской области. Некоторые разработки позволяют прокладывать маршрут в зависимости от загруженности автотранспорта на улицах, тем самым позволяя объезжать труднопроходимые улицы.

В описанной в статье методах, помимо сокращения расходов на транспортные услуги, имеются расходы на установку сортировочных станций, что необходимо учитывать при разработке проекта. Выбор места не всегда может быть удобным с градостроительной точки зрения или быть осуществимым в рамках текущей ситуации с застройкой города.

Литература

1. Михайлов А.В., Мельберт А.А., Егоров В.И. Мониторинг атмосферы с применением электронной картографической системы // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 5. С. 283-285.

Прогнозирование температуры вспышки бинарных жидких смесей

З.Н. Есина, М.Р. Корчуганова, В.В. Мурашкин

Кемеровский государственный университет

Безопасность при производстве и хранении горючих жидкостей является одной из важнейших задач, поскольку часто случаются опасные ситуации, такие как взрывы на бензозаправках, аварии при перевозке горючих веществ и т.д. Опасность воспламенения жидкостей прежде всего характеризуется их точкой вспышки. Точка вспышки определяется как температура, при которой жидкость испаряется и образует горючую смесь с воздухом. Точка вспышки смеси - критическое свойство, но экспериментальные данные для многих смесей отсутствуют, а получение таких данных дорого и отнимает много времени. Поэтому разработка математических моделей для анализа состояния окружающей среды в условиях увеличения риска возникновения чрезвычайных ситуаций, является важной научной и практической задачей.

Термодинамические свойства иногда трудно измерить экспериментально, и в этом случае необходима прогнозирующая модель. Несколько моделей для предсказания точки вспышки для смесей различных типов были предложены ранее [1-3, 4-11]. Модели, разработанные для идеальных растворов [4-6] непригодны для неидеальных смесей, которые встречаются наиболее часто. Неидеальность растворов обусловлена взаимодействием молекул. Влияние неидеальности жидкой фазы на коэффициенты активности учитывается посредством построения соответствующих термодинамических моделей, которые можно разделить на две категории: модели с использованием экспериментальных данных и, так называемые, априори прогнозирующие модели. Для моделирования свойств неидеального раствора необходимо уметь рассчитывать коэффициенты активности компонентов смеси в жидкой фазе. Если параметры взаимодействия рассчитываются по экспериментальным данным, то модель относят к первой категории. Если параметры, описывающие взаимодействия молекул определены независимым экспериментальным методом, типа инфракрасной спектроскопии, тогда можно доказать возможность разработки прогнозирующей модели первого типа. В моделях второго типа требуются только атомные параметры, и прогноз термодинамических свойств делается на основе квантово-химических расчетов, что дает необходимую информацию для оценки молекулярных взаимодействий.

Часто используются термодинамические модели NRTL, Вильсон и UNIQUAC, но в этих моделях бинарные параметры взаимодействия рассчитываются по экспериментальным данным. Поэтому эти модели не являются прогнозирующими. Модель UNIFAC [12] является прогнозирующей, т.к. не нуждается в экспериментальных данных для расчета параметров бинарного взаимодействия. Для оценки взаимодействия используются параметры групповых вкладов [10, 13].

Общая модель для предсказания температуры вспышки смеси предложена Лиу и др. [1,2] на основе модифицированного уравнения Ле-Шателье (1), уравнения Антуана (2), и модели для оценки коэффициента активности [3]:

$$\sum_i x_i \gamma_i P_i / P_{i,fp}^0 = 1, \quad (1)$$

$$\log P_i = A - B_i / (T + C_i), \quad (2)$$

где x_i - мольная доля компонента в жидкости; γ_i - коэффициент активности компонента; P_i - давление насыщенного пара i -го компонента смеси при заданной температуре; $P_{i,fp}^0$ - давление пара чистого горючего компонента i в его точке вспышки, соответственно.

Уравнение Ле-Шателье $L = 1 / \sum_i p_i / L_i$ применяется для определения границы взрыва смеси паров и представляет собой формулу для расчета средней гармонической величины, где L - предел воспламенения смеси; L_i - пределы воспламеняемости отдельных компонентов; p_i - вклад отдельных компонентов в изучаемое свойство жидкой смеси. В частности, уравнение позволяет определить среднее давление P_{fp} , при котором может произойти вспышка, тогда $L_i = P_{i,fp}^0$. При условии фазового равновесия жидкости и пара парциальное давление пара компонента неидеальной жидкости имеет вид $p_i = x_i \gamma_i P_i$. Коэффициент активности вводится как характеристика неидеальности смеси. Если коэффициент активности равен единице, это означает, что взаимодействия между различными, или теми же самыми молекулами идентичны, и смесь находится в идеальном состоянии; если коэффициент активности отличен от единицы, смесь находится в неидеальном состоянии. В случае идеального раствора, $\gamma_i = 1$, парциальное давление компонента пропорционально его доле в растворе $p_i = x_i P_i$, что представляет собой формулировку закона Рауля. Уравнение Антуана представляет собой приближенную запись уравнения Клаузиуса-Клаперона для равновесия жидкой и паровой фаз и дает возможность от давления перейти к температуре, характеризующей точку вспышки и найти зависимость температуры вспышки от состава. Для расчета температуры вспышки на базе моделей равновесия по заданному составу раствора определяют коэффициенты активности компонентов γ_i , затем по уравнению Антуана

находят давление пара компонентов смеси $P_{i,fp}^0$ при температуре вспышки чистых компонентов. Температура вспышки T_{fp} для смеси находится в результате совместного решения уравнения Антуана (2) и уравнения (1). Подстановка давления P_i из уравнения Антуана в уравнение Ле-Шателье позволяет рассчитать температуру вспышки для всего диапазона составов раствора, т.е. зависимость $T(x)$. Основная проблема заключается в определении коэффициентов активности компонентов неидеальной смеси. Эта задача может быть решена, если использовать методы математического моделирования.

Молекулярные термодинамические модели фазового равновесия растворов можно также разделить на два типа: модели коэффициентов активности (или энергии Гиббса) и уравнения состояния. Соотношение, связывающее между собой коэффициенты активности γ_i и избыточную свободную энергию Гиббса G^E : $RT \sum x_i \ln \gamma_i = G^E$. Из моделей коэффициентов активности жидкой фазы можно выделить два вида: 1) модели применяемые для неполярных систем; например, смесей углеводородов, изомеров, и гомологов, которые включают теорию регулярного раствора (RST) и модели Флори-Хаггинса; 2) модели, применяемые для неполярных и полярных систем. Эти модели обычно используются для предсказания коэффициентов активности жидкой фазы и включают уравнение Ван-Лаара, уравнение Вильсона, NRTL, уравнение UNIQUAC, уравнение UNIFAC и др.

Видал и др. [13] объединили прогноз точки вспышки Лиу и др. [1,2] с моделью UNIFAC, чтобы предсказать минимум для сильно неидеальных растворов. Гмелинг и Расмуссен рассчитывали точку вспышки бинарных систем, применяя для оценки коэффициентов активности модель UNIFAC [10,14]. В минимуме точки вспышки смеси температура вспышки может понизиться на несколько градусов, увеличивая риск взрыва, что часто сопровождается положительным отклонением равновесия жидкость-пар от закона Рауля [9,13,15]. Максимум на кривой поведения точки вспышки связан с отрицательным отклонением от закона Рауля равновесия жидкость-пар, что связано с понижением риска взрыва [16].

В оригинале модели UNIFAC [12] логарифм коэффициентов активности складывается из комбинаторной и остаточной частей. Чтобы улучшить характеристики оригинальной модели UNIFAC, прогнозирующей равновесие жидкость-пар (VLE), жидкость - жидкость (LLE), и избыточные энтальпии, было предложено несколько версий модели [17-20]. Для описания коэффициента активности в оригинальной версии модели UNIFAC [12] используется выражение: $\ln \gamma_i = \ln \gamma_i^C + \ln \gamma_i^R$, как сумма комбинаторной и остаточной частей. Комбинаторная часть $\ln \gamma_i^C$ объясняет различия в размере и форме молекул, и остаточной части. Остаточная часть γ_i^R вводится для учета эффектов, являющихся результатом энергетически эффективных взаимодействий между групповыми вкладками. Комбинаторная часть представлена в виде:

$$\ln \gamma_i^C = \ln \frac{\phi_i}{x_i} + \frac{z}{2} q_i \ln \frac{\theta_i}{\phi_i} + l_i - \frac{\phi_i}{x_i} \sum_i^N x_i l_i, \quad l_i = \frac{z}{2} (r_i - q_i) - (r_i - 1),$$

где ϕ_i - доля сегмента компонента i , θ_i - доля площади поверхности компонента i , которые вводятся как:

$$\phi_i = \frac{x_i y_i}{\sum_j s_j y_j}, \quad \theta_i = \frac{x_i q_i}{\sum_j x_j q_j},$$

где r_i и q_i - составляющие для чистых компонентов объемного параметра и параметра площади, соответственно. Остаточная часть получена, используя следующие соотношения:

$$\ln \gamma_i^R = \sum_k v_k^{(i)} (\ln \Gamma_k - \ln \Gamma_k^{(i)}), \quad \ln \Gamma_k = Q_k \left[1 - \ln \left(\sum_m \Theta_m \Psi_{mk} \right) - \sum_m \frac{\Theta_m \Psi_{km}}{\sum_h \Theta_h \Psi_{hm}} \right], \quad \Theta_m = \frac{Q_m X_m}{\sum_h Q_h X_h},$$

где $X_m = \frac{\sum_j v_m^{(j)} x_j}{\sum_j \sum_h v_h^{(j)} x_j}$ - доля группы m в смеси. Групповой параметр взаимодействия: $\Psi_{mk} = \exp \left(-\frac{\alpha_{mk}}{T} \right)$.

Основным недостатком модели UNIFAC и ее версий является необходимость создания базы данных групповых параметров чистых компонентов и параметров взаимодействия. Групповые вклады этих параметров систематически улучшаются консорциумом UNIFAC [21].

В работе [22] предсказывается точка вспышки смесей (модель прогноза точки вспышки Liaw и Chiu [3]), для расчета поведения коэффициентов активности жидкой фазы используются модели типа UNIFAC, которые не нуждаются в экспериментальных данных, чтобы найти параметры бинарной системы. На рис. 1 представлены экспериментальные данные [22], а также результаты расчета коэффициентов активности и температуры точки вспышки. Использовались различные версии модели UNIFAC и модели NRTL для идеальной системы этанол + 1-бутанол (рис. 1а) и системы этанол + ацетон с положительным отклонением от идеальности (рис. 1б). Как можно видеть на рис. 1, имеется

значительный разброс в результатах расчетов коэффициентов активности и температуры вспышки по разным моделям.

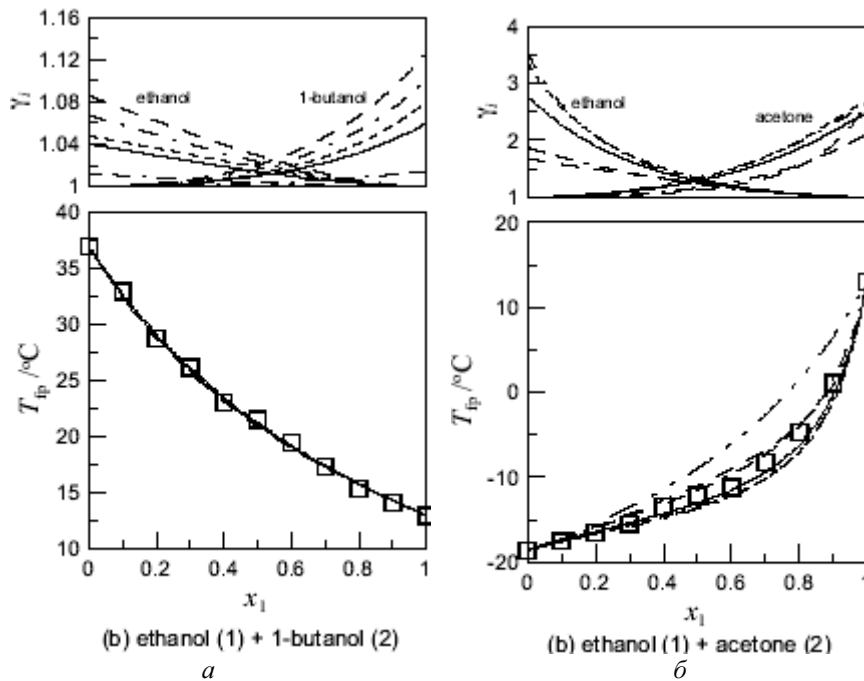


Рис. 1. Сравнение коэффициентов активности и предсказанной точки вспышки с экспериментальными данными [22] для идеального раствора этанол + 1-бутанол (1а) и раствора с положительным отклонением от идеальности этанол + ацетон (1б): \square - экспериментальные данные, «-» - оригинал UNIFAC; «----» - UNIFAC DORTMUND; «-·-» - UNIFAC Linghamby; «- - -» - версия UNIFAC Bastos и др.; «-·-·-» - NRTL; «- - -» - идеальный раствор.

В данной работе обсуждается метод расчета температуры вспышки по результатам моделирования равновесия жидкость-пар при постоянном давлении на основе калорического уравнения состояния. Уравнение состояния используется для представления фазового равновесия в широком диапазоне температур и давлений, а также для расчета тепловых и объемных свойств. Фазовое поведение смесей усложняется, если имеется большая разница в их физических свойствах, типа полярности или критических свойств. В этом случае модель уравнения состояния имеет преимущество по сравнению с моделью коэффициента активности. Уравнения состояния характеризуют определенную фазу вещества и разделяются на калорическое и термическое уравнения. Калорическим называют уравнение состояния, в котором в качестве переменных используются различные виды энергии. Одна из форм калорического уравнения состояния

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^n \mu_i dN_i, \quad (3)$$

где $U = f(S, V, N_1, N_2, \dots, N_n)$ - внутренняя энергия фазы как функция энтропии, объема и числа молей компонентов, образующих фазу; $\mu_i = (\partial U / \partial N_i)_{S, V, N_{j \neq i}}$ - химический потенциал i -го компонента; $T = (\partial U / \partial S)_{V, N_{j \neq i}}$ - температура; $P = (\partial U / \partial V)_{S, N_{j \neq i}}$ - давление.

Уравнение состояния (3) можно записать в другой форме, используя в качестве характеристической функции энергию Гиббса $G^E(P, T, x_1, x_2, \dots, x_n)$: $dG^E = -SdT + VdP + \sum_{i=1}^n \mu_i dx_i$. Уравнение состояния фазы

можно записать также в виде $-SdT + VdP - \sum_{i=1}^n x_i d\mu_i = 0$, где от числа молей компонентов сделан переход к их молярным долям x_i . Разность уравнений состояния бинарной системы для реальной и идеальной равновесных фаз можно представить в виде [23]:

$$-(H^E / RT^2)dT + (V^E / RT)dP = \sum_{i=1}^2 x_i d \ln \gamma_i, \quad (4)$$

где γ_i - коэффициент активности компонента, $i = 1, 2$; x_i - молярная доля i -го компонента; H^E - энтальпия смешения; V^E - избыточный объем; P - давление раствора; T - абсолютная температура; R - универсальная газовая постоянная.

Таким образом, уравнение (4) позволяет найти коэффициенты активности компонентов, если известна энтальпия смешения и избыточный объем. Если происходит образование ассоциатов молекул чистых компонентов, то эффективная молярная масса компонента в растворе может быть рассчитана по формуле: $\mu' = \lambda_i \mu_i$, где μ_i - молярная масса компонента до смешения, λ_i - поправочные коэффициенты. Среднее соотношение числа молекул в ассоциатах чистых компонентов $\lambda = \lambda_1 / \lambda_2$ характеризует устойчивую структуру раствора. Отличие коэффициента λ от единицы свидетельствует о наличии отклонения от идеальности в бинарной системе и необходимости перехода к эффективным молярным долям для получения термодинамически согласованных моделей. Эффективные молярные доли компонентов бинарной смеси [27]: $z_1 = x_1 / (x_1 + \lambda x_2)$, $z_2 = x_2 / (x_1 / \lambda + x_2)$.

В [24] рассматривается метод моделирования диаграмм фазового равновесия жидкость-твердое в реальных растворах, основанный на минимизации избыточной энергии Гиббса по так называемому параметру сольватации λ , как отношению числа молекул чистых компонентов в образующемся молекулярном соединении. Минимизация избыточной энергии Гиббса по параметру сольватации приводит к уравнению, моделирующему диаграмму фазового равновесия жидкость-твердое при $P = \text{const}$:

$$T(z_1) = \left[H_1^E z_1 + H_2^E (1 - z_1) \right] / \left[(H_1^E / T_1^0) z_1 + (H_2^E / T_2^0) (1 - z_1) - R(z_1 \ln z_1 + (1 - z_1) \ln(1 - z_1)) \right] \quad (5)$$

где T - температура ликвидуса; H_i^E - энтальпия и T_i^0 - температура плавления компонента, образующего однокомпонентную фазу, $i = 1, 2$.

В большинстве реальных растворов происходит взаимодействие компонент, приводящее к образованию молекулярных соединений типа АВ. Коэффициент сольватации $\lambda = \lambda_1 / \lambda_2$ показывает отношение числа молекул А к числу молекул В в образующемся молекулярном соединении. Молекулы компонент А и В могут также образовывать кластеры, состоящие из молекул одного вида. Отношение числа молекул компонента А к числу молекул компонента В, объединившихся в ассоциаты, будем характеризовать коэффициентом ассоциации $k = k_1 / k_2$. Коэффициент ассоциации k_1 показывает, сколько молекул компонента А в жидкой фазе объединились в кластер типа АА, аналогично, коэффициент ассоциации k_2 показывает, сколько молекул компонента В в жидкой фазе объединились в кластер типа ВВ.

Модель PCEAS (Phase Chart Eutectic and Azeotropic Systems), предлагаемая авторами данной работы, является моделью уравнения состояния и основана на минимизации избыточной энергии Гиббса по параметру сольватации λ , характеризующему отношение числа молекул А к числу молекул В в молекулярном соединении. Уравнение (5) позволяет найти зависимость температуры смеси от состава при постоянном давлении. Программа PCEAS позволяет рассчитать равновесие жидкость – твердое, а также равновесие жидкость-пар при постоянном давлении или при постоянной температуре. Входными данными являются температура T_i и энтальпия фазовых переходов H_i^0 чистых компонентов. Программа дает возможность определить средние величины коэффициента сольватации $\bar{\lambda}$, а также коэффициента ассоциации \bar{k} и рассчитать коэффициенты активности. Существует возможность построить прогнозирующую модель равновесия жидкость-пар. Для этого нужно найти способ оценки параметра ассоциации в паре, что позволит избежать использования экспериментальных данных о фазовом равновесии. Результат расчета зависит от выбранной модели ассоциации в паре, которая должна быть основана на независимых экспериментальных данных, например, данных спектроскопии. Для характеристики кластера в паровой фазе введем коэффициент ассоциации $n = n_1 / n_2$, характеризующий отношение числа молекул чистых компонентов в образующемся молекулярном соединении в паровой фазе. Коэффициент ассоциации в жидкой фазе $k = k_1 / k_2$ найдем в результате применения процедуры термодинамического согласования коэффициентов активности для системы жидкость-твердое. Коэффициент ассоциации в паре $n = n_1 / n_2$ используется для расчета энтальпии испарения при бесконечном разбавлении, что дает возможность рассчитать фазовое равновесие жидкость-пар при постоянном давлении, а также определить параметры азеотропов. В результате исследования бинарной эвтектической системы по полученным данным о коэффициентах сольватации и ассоциации в соответствии с принятой моделью ассоциации в паре рассчитывается теплота смешения при бесконечном разбавлении (теплота фазового перехода жидкость-пар): $H_{i,ac-n}^E = k_i H_{i,ucn}^0 / n_i$, где k_i , n_i – коэффициенты сольватации и ассоциации в жидкости и в паре, соответственно; $H_{i,ucn}^0$ – энтальпия испарения чистого i -го компонента. Кроме того, модель позволяет рассчитать все избыточные термодинамические функции, такие как избыточная энергия Гиббса G^E , энтальпия смешения H^E и избыточная энтропия S^E .

Фазовые равновесия жидкость-твердое и жидкость-пар в бинарных системах этанол + 1-бутанол и этанол + ацетон, а также зависимость температуры вспышки от состава раствора рассчитывались с применением программы PCEAS при атмосферном давлении. На рис. 2-3 представлены результаты

расчета температуры кипения, и температуры точки вспышки с использованием модели PCEAS для идеальной системы этанол + 1-бутанол (рис. 2) и системы этанол + ацетон с положительным отклонением от идеальности (рис. 3).

На рис. 4 приведены результаты расчета коэффициентов активности по модели PCEAS для систем этанол + 1-бутанол и этанол + ацетон при нормальном атмосферном давлении.

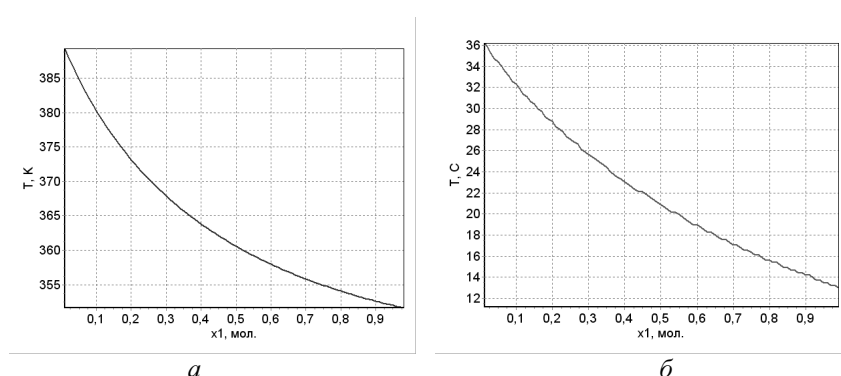


Рис. 2. Расчет зависимости $T(x)$ по модели PCEAS для системы этанол + 1-бутанол :
 а – температура кипения; б – температура точки вспышки.

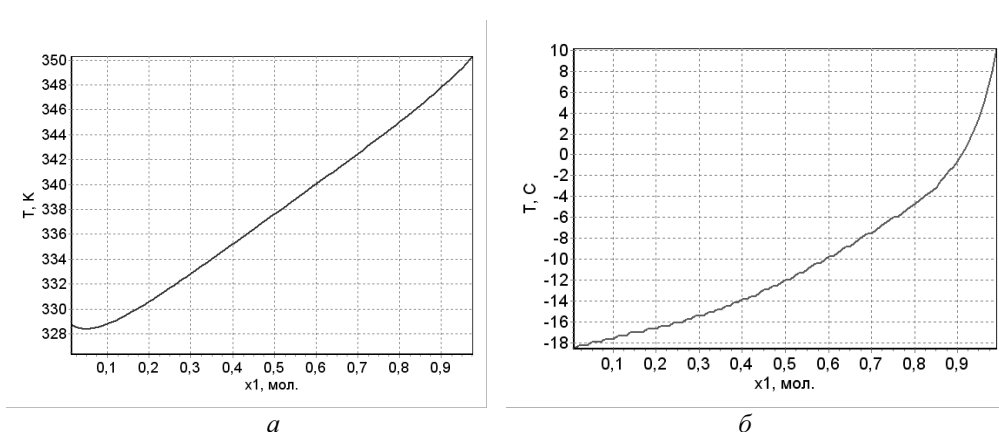


Рис. 3. Расчет зависимости $T(x)$ по модели PCEAS для системы этанол + ацетон:
 а – температура кипения; б – температура точки вспышки.

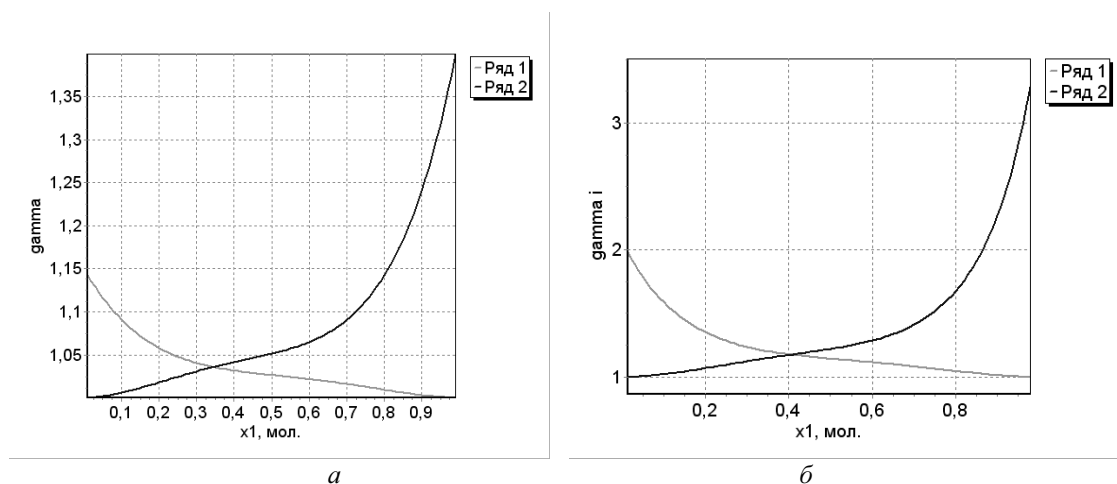


Рис. 4. Расчет коэффициентов активности при $P = 101,4$ кПа по модели PCEAS для растворов:
 а – этанол + 1-бутанол, Ряд 1 – коэффициент активности (этанол), Ряд 2 – коэффициент активности (1-бутанол); б – этанол + ацетон с формированием экстремумов точки вспышки, Ряд 1 – коэффициент активности (этанол), Ряд 2 – коэффициент активности (ацетон).

Представлен метод прогнозирования зависимости температуры вспышки бинарных горючих жидких смесей от состава раствора. Метод основан на использовании данных о давлении смеси, полученных с применением математического моделирования кривых фазового равновесия при изобарных условиях. Для прогнозирования температуры вспышки бинарной смеси необходимы данные об энтальпии и

температуре плавления, энтальпии и температуре кипения, а также температуре вспышки чистых компонентов.

Литература

1. Liaw H.-J., Lee Y.-H., Tang C.-L. et al. A mathematical model for predicting the flash point of binary solutions // *J. Loss Prev. Process.* 2002. Vol. 15. P. 429-438.
2. Liaw H.-J., Chiu Y.-Y. The prediction of the flash point for binary aqueous-organic solutions // *J. Hazard Mater.* 2003. Vol. 101. P. 83-106.
3. Liaw H.-J., Chiu Y.-Y. A general model for predicting the flash point of miscible mixture. // *J. Hazard Mater.* 2006. Vol. 137. P. 38-46.
4. Affens W.A., McLaren G.W. Flammability properties of hydrocarbon solutions in air // *J. Chem Eng. Data.* 1972. Vol. 17. P. 482-488.
5. White D., Beyler C.L., Fulper C., Leonard J. Flame Spread on Aviation Fuels. // *Fire Saf. J.* 1997. N 28. P. 1-31.
6. Garland R.W., Malcolm M.O. Evaluating vent manifold inerting requirements: flash point modeling for organic acid-water mixtures // *Process Saf. Prog.* 2002. N 21. P. 254-260.
7. Liaw H.-J., Tang C.-L., Lai J.-S. A model for predicting the flash point of ternary flammable solutions of liquid // *Combust. Flame.* 2004. N 138. P. 308-319.
8. Liaw H.-J., Wang T.-A. A non-ideal model for predicting the effect of dissolved salt on the flash point of solvent mixtures // *J. Hazard Mater.* 2007. N 141. P. 193-201.
9. Catoire L., Paulmier S., Naudet V. Estimation of closed cup flash points of combustible solvent blends // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 2006. N 35. P. 9-14.
10. Gmehling J., Rasmussen P. Flash points of flammable liquid mixtures using UNIFAC // *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 1982. N 21. P. 186-188.
11. Lee S.-J., Ha D.-M. The Lower Flash Points of Binary Systems Containing Non-flammable Component // *Korean J. Chem. Eng.* 2003. N 20. P. 799-802.
12. Fredenslund A., Jones R.L., Prausnitz J.M. Group-Contribution Estimation of Activity Coefficients in Nonideal Liquid Mixtures // *AIChE J.* 1975. N 21. P. 1086-1099.
13. Vidal M., Rogers W.J., Mannan M.S. Prediction of minimum flash point behaviour for binary mixtures // *Process Saf. Environ. Prot.* 2006. N 84. P. 1-9.
14. Zabetakis M.G. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors // U.S. Dept of the Interior, Bureau of Mines. Washington, 1965.
15. Liaw H.-J., Lee T.-P., Tsai J.-S. et al. Binary liquid solutions exhibiting minimum flash-point behavior // *J. Loss Prev. Process.* 2003. N 16. P. 173-186.
16. Liaw H.-J., Lin S.-C. Binary mixtures exhibiting maximum flash-point behavior // *J. Hazard. Mater.* 2007. N 140. P. 155-164.
17. Weidlich U., Gmehling J. A Modified UNIFAC Model. 1. Prediction of VLE, hE, and gamma Infinite // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1987. N 26. P. 1372-1381.
18. Gmehling J., Li J., Schiller M. A modified UNIFAC model. 2. Present parameter matrix and for different thermodynamic properties // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1993. N 32. P. 178-193.
19. Larsen B.L., Rasmussen P., Fredenslund A. A Modified UNIFAC Group Contribution Method for Prediction of Phase Equilibria and Heats of Mixing? // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1987. N 26. P. 2274-2286.
20. Magnussen T., Rasmussen P., Fredenslund A. UNIFAC Parameter Table for Prediction of Liquid-Liquid Equilibria // *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1981. N 20. P. 331-339.
21. The UNIFAC Consortium. <http://unifac.dbst.de/> (accessed 2010).
22. Liaw H.-J., Gergaud V., Li Y.-H. Prediction of miscible mixtures flash-point from UNIFAC group contribution methods // *Fluid Phase Equilibria.* 2011. N 300. P. 70-82.
23. Коган В.Б. Гетерогенные равновесия. Л.: Химия, 1968. 432 с.
24. Захаров Ю.Н., Есина З.Н., Корчуганова М.Р. Фазовые переходы как причина катастроф на предприятиях переработки угля и нефти // *Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск 17 «Кузбасс-2».* М.: Изд-во «Горная книга», 2009. С. 54-58.

Информационно-моделирующие комплексы для изучения водных объектов Сибири (на примере Верхней Оби)

А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, О.В. Ловцкая, А.В. Кудишин

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Обобщить и проанализировать значительные объемы информации с пространственной привязкой в условиях географической, структурной и ведомственной разобщенности ее источников практически невозможно без создания единой системообразующей основы. В качестве такой основы выступают реестровые ГИС как инструмент доступа к базам данным, обеспечивающий реализацию запросов на поиск и отображение необходимой информации.

Значительный опыт по созданию и ведению реестра водных объектов накоплен в ИВЭП СО РАН, где разработанная специалистами института ГИС «Реестр водных объектов Алтайского края» (далее – ГИС «Реестр водных объектов АК») успешно эксплуатируется в отделе водных ресурсов по Алтайскому краю Верхне-Обского БВУ.

ГИС «Реестр водных объектов АК» разрабатывался для информационной поддержки принятия решений по управлению водными ресурсами и водохозяйственным комплексом Алтайского края. При этом требования к программному комплексу и инструментарию, а также составу параметров, характеризующих состояние водных объектов и определяющих состав и структуру базы данных системы, устанавливались пользователями ГИС – специалистами Отдела водных ресурсов по Алтайскому краю.

Для решения водохозяйственных и прочих задач применительно к территории Обь-Иртышского бассейна (ОИБ) создана ГИС «Реестр водных объектов ОИБ», подобная вышеупомянутой ГИС «Реестр водных объектов АК», которая расширена территориально (охватывает Обь-Иртышский бассейн) и функционально в связи с возникновением новых задач.

Ее особенности следующие. Для совместимости с информационной моделью данных центрального аппарата Росводресурсов база данных ВО БВУ ГИС строится на базе картографической основы масштаба 1:1 000 000 и содержит следующие основные группы слоев (кроме слоев топографической основы):

мониторинг

- источники сбросов в водные объекты (по 2ТП-водхоз),
- створы гидрологических и гидрохимических наблюдений,
- метеорологические посты;

гидрография

- крупные озера
- основные реки
- озера, согласованные с Государственным водным реестром,
- реки, согласованные с Государственным водным реестром;

границы

- водохозяйственные участки,
- природные зоны,
- бассейны основных рек, зональные области

Функциональность разработанной ГИС обеспечивается встроенными средствами используемого базового программного обеспечения и включает основные операции поиска и визуализации объектов.

Система на первом этапе обеспечивает удовлетворение простых запросов пользователей на поиск и отображение необходимой картографической и атрибутивной информации (информационно-справочный режим). Для того, чтобы перейти от информационно-справочной системы к информационно-аналитическим системам (ИАС), необходимо использование моделирующих комплексов, предназначенных для выполнения сложных прогнозных и диагностических задач.

С этой целью разработан универсальный механизм включения моделирующих комплексов в информационно-аналитическую систему, в которой ГИС «Реестр водных объектов» выступает в роли управляющего блока, обеспечивая интерфейс доступа пользователя к базам данных, интерфейс управления библиотекой моделирующих комплексов, интерфейс визуализации и анализа данных с целью выработки необходимых решений.

Общая структура моделирующего комплекса и связанных с ним потоков данных показана на рис. 1. На входе и выходе моделирующего блока данные представлены в унифицированном формате. На входе унифицированные данные адаптируются к формату и структуре исходных данных модели. Блок экспорта данных должен поддерживать:

- передачу данных простой структуры относительно небольшого размера (передача значений основных переменных задачи в другие расчетные блоки);

- передачу данных сложной структуры и большого размера (передача значений основных переменных и их комбинаций в основную базу данных или ГИС-системы).

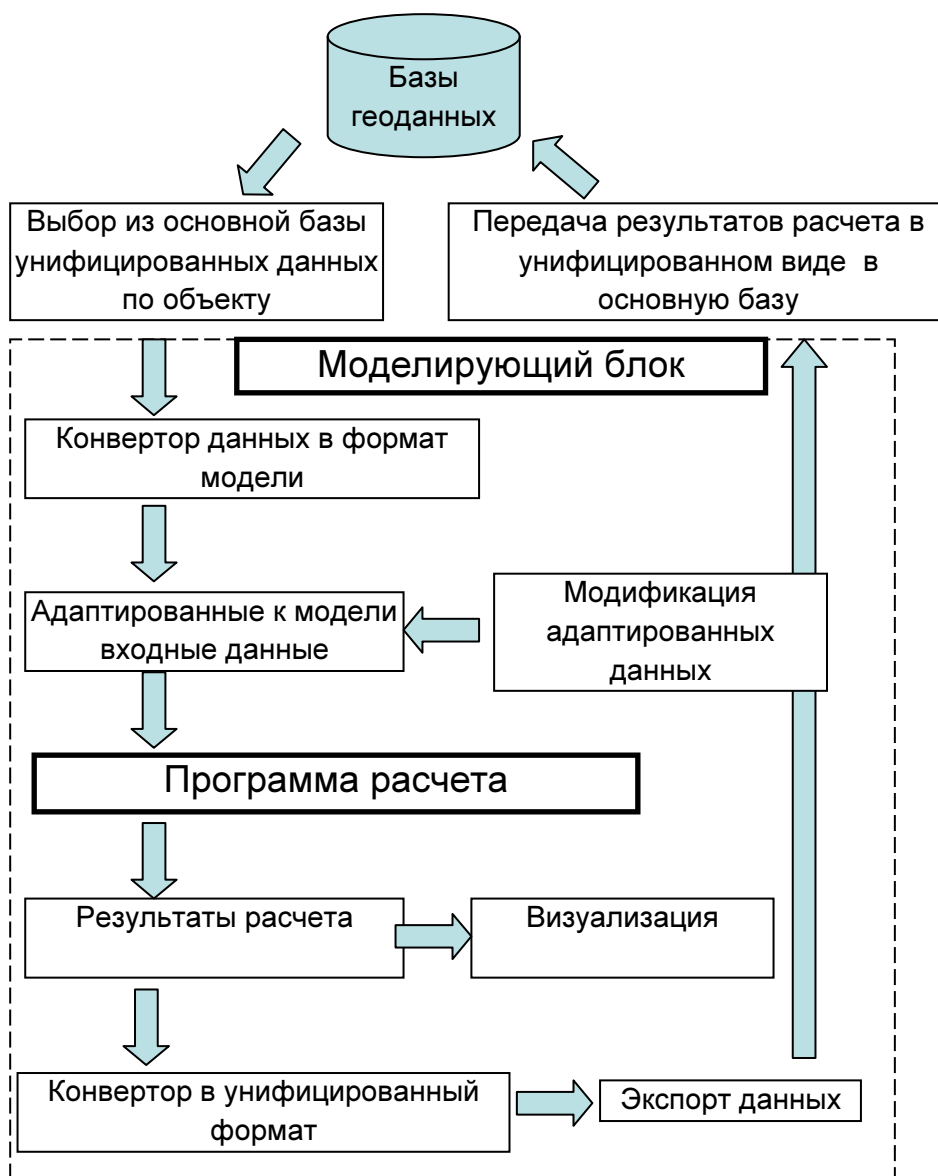


Рис. 1. Общая структура моделирующего блока и связанных с ним потоков данных.

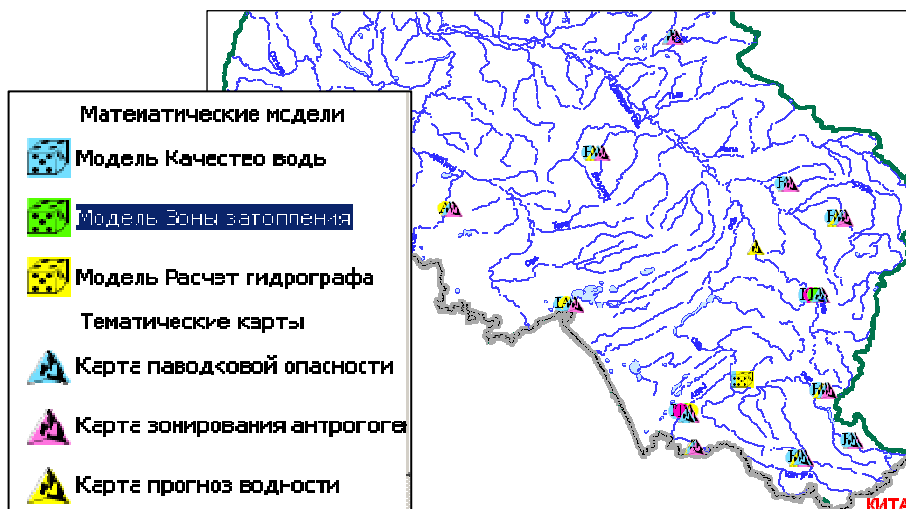


Рис. 2. Слой тематической информации и связанная с ним легенда.

Для управления моделирующими комплексами создан специальный векторный слой (слой тематической информации), на котором отмечены моделируемые объекты (рис. 2).

Рис. 3 иллюстрирует взаимодействие моделирующих комплексов и ГИС «Реестр водных объектов ОИБ».

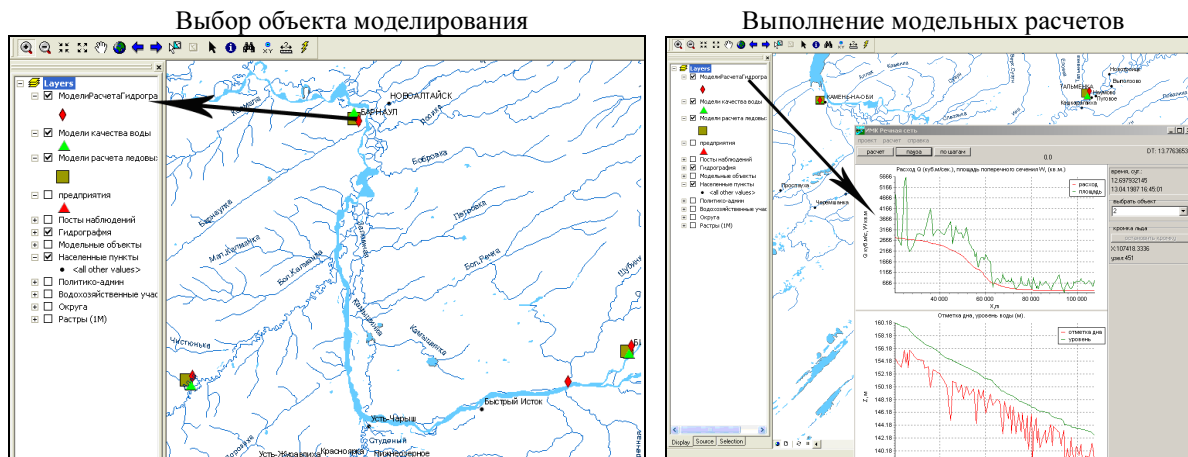


Рис. 3. Взаимодействие ГИС «Реестр водных объектов ОИБ» и моделирующего комплекса.

К настоящему времени в систему включены 3 моделирующих комплекса, актуальных для Верхне-Обского БУ и направленных на прогнозирование развития пространственно-временных процессов:

- расчет показателей качества воды на основе одномерной (1DH) модели, воспроизводящей временное и пространственное распределение содержания в реке химических компонентов;
- расчет течений в системах русел на основе нестационарной 1DH-модели;
- расчет зоны затопления пойменных территорий для сложных в морфометрическом отношении участков речных русел на основе плановой (2DH) модели.

При расчете зон затопления необходимо также учитывать и существенно нестационарный характер половодий и паводков. Использование квазиодномерных (1DH) уравнений Сен-Венана становится затруднительным вследствие ограниченности самой модели, плохо отслеживающей возможную значительную разницу поведения потока в русле и на пойме. Более совершенной является модель на основе плановых (2DH) уравнений Сен-Венана. Решение плановых двумерных уравнений следует использовать для моделирования течений на отдельных ограниченных участках крупных рек со сложной морфологией. Однако ее применение требует более детальной эмпирической информации и одновременно для нестационарных случаев значительных объемов для хранения расчетных данных. В этом случае представляется целесообразным объединение расчетного модуля с традиционными подходами на основе ГИС-технологий.

В качестве примера реализации информационно-моделирующего комплекса приводится тестовый расчет половодья на реальном участке р. Обь около г. Барнаула. Использовалась пространственная сетка 830 x 1265 с шагом 10м в обоих направлениях. Начальный и конечный расход полагался 843 м³/с, а максимальный – 2540 м³/с. Результаты расчетов приводятся на рис. 4, 5.

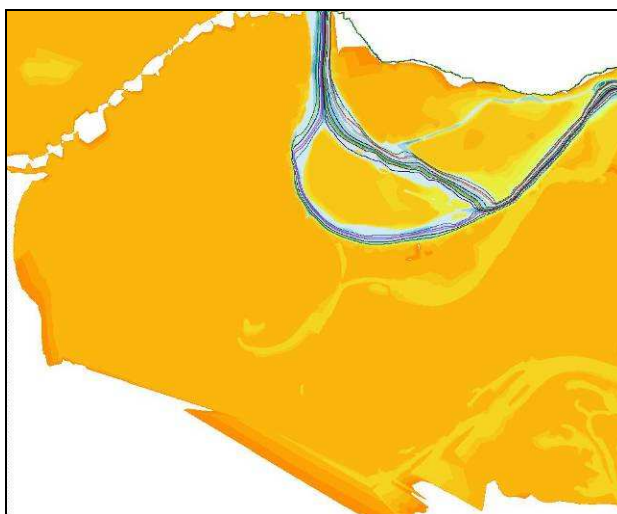


Рис. 4. Начальное состояние русла (глубина и линии тока) р. Обь, вычисленное путем установления.

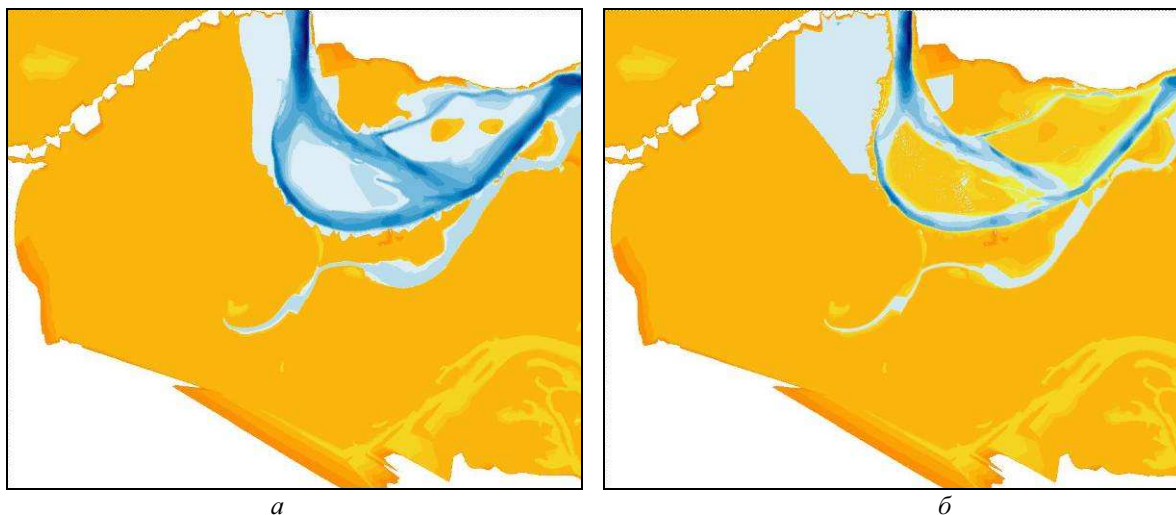


Рис. 5. Рассчитанное положение русла р. Обь:
а – в пик половодья. Изменение глубины воды приведено с шагом 1м; *б* – по окончанию половодья.

Состояние основного русла на рис. 5,*б* соответствует его начальному положению. Однако имеется много пойменных участков, все еще покрытых водой.

Работа выполнена в рамках проекта IV.31.2.12. Разработка проблемно-ориентированных ГИС и информационно-моделирующих комплексов для изучения водных объектов Сибири на основе новых методов интеграции пространственных междисциплинарных данных. Координаторы – ак. Ю.И. Шокин, чл.-к. РАН И.В. Бычков.

Оптимизация Распределения материальных ресурсов при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера в химической промышленности

Б.Р. Исмаилов¹, А.Ш. Шарафиев², Х.Б. Исмаилов¹

¹ Южно-Казахстанский государственный университет им. М.О. Ауезова, Шымкент, Казахстан

² Республиканский научный центр по проблемам безопасности в химической, нефтеперерабатывающей и биологической промышленности МЧС Республики Казахстан

За последние десятилетия усилилось негативное влияние производственных (в особенности, химических) факторов на население, производственную и социальную инфраструктуру и экологическую систему, увеличился риск возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера (ЧС ТХ) на потенциально опасных химических предприятиях различной организационно-правовой формы и формы собственности. Для устранения вышеприведенных опасностей, приоритетными направлениями в области обеспечения химической и биологической безопасности должны стать: совершенствование государственного регулирования и нормативно-правовой базы; развитие промышленной политики; использование успехов фундаментальной и прикладной науки, технологий и техники; предупреждение чрезвычайных ситуаций и ликвидация их последствий; подготовка и повышение квалификации кадров. Решение этих задач достигается путем создания государственной системы обеспечения промышленной и химической безопасности Республики Казахстан (как подсистемы единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций), предусматривающей категорирование, прогнозирование, предупреждение и парирование угроз химической безопасности, ликвидацию последствий чрезвычайных ситуаций в результате воздействия химических, а также биологических факторов.

Разработка мер технологического и управленческого характера, направленных на уменьшение риска ЧС ТХ и ликвидации их последствий требует привлечения огромного материального и информационного ресурса. Решение этой проблемы требует учета большого числа параметров: экономических (необходимые ресурсы по ликвидации аварий на промпредприятиях, транспортные средства, материалы и т.д.), информационных (создание соответствующих баз данных по химически опасным веществам, методики расчета и компьютерных программ и т.д.), организационно-управленческих (перераспределение материальных ресурсов при крупномасштабных катастрофах, повышение квалификации сотрудников и т.д.). Оптимальное варьирование материально-техническими и информационными ресурсами возможно при применении современных методов и представлений соответствующего научного направления логистики.

В экономических задачах методы логистики развиты достаточно и с успехом применяются на практике. Учеными разных направлений разработаны эффективные методики рационального управления распределением материальных и информационных ресурсов. В России, Германии, Франции, Казахстане и др. странах имеются определенные разработки и научно-технический потенциал, направленные на решение аналогичных задач. Однако эти результаты не адаптированы к решению задач повышения промышленной безопасности, не учитывают специфику и необходимости оперативного реагирования соответствующих структур и государственных органов на снижение риска чрезвычайных ситуаций техногенного характера (ЧС ТХ) и уменьшения их вредных последствий.

Поэтому, разработка подсистем интегрированной логистики по мониторингу и моделированию причин и последствий чрезвычайных ситуаций техногенного характера и внедрение их в практику деятельности МЧС является актуальной задачей.

В ЮКГУ им. М. Ауезова и ДГП «РНИЦБХП» РГП «НИИЦ» МЧС РК была выполнена научная программа «Мониторинг, моделирование и прогнозирование катастроф и аварий техногенного характера в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности». По результатам этой программы разработана «Методика прогнозирования и оценки химической обстановки при аварии на химически опасном объекте и на транспорте», соответствующая компьютерная программа ее реализации. Применение этой методики и программы позволяет рассчитать прогнозируемые значения параметров возможной зоны заражения для данной местности. Далее возникает задача оптимального управления распределением материальных и информационных ресурсов, направляемых на ликвидацию (снижение) последствий ЧС ТХ. Проведенный нами анализ имеющихся работ позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективно эта системная задача может быть решена методами логистики.

Применение методов логистики позволяет оптимизировать распределения материальных и информационных ресурсов, имеющихся в распоряжении системы МЧС. Главный эффект в этом – снижение вероятностей человеческих жертв, материальных потерь и экологически вредных последствий. Принятие решений при организации мер, направленных на устранение последствий ЧС ТХ является достаточно специфическим: необходимо учитывать меняющуюся обстановку и оперативность, учитывать большое количество параметров, рационально распределить имеющиеся материальные и информационные ресурсы и т.д. Поэтому, принятие решений должно основываться на формализованном

описании задачи, количественном анализе влияющих факторов и достигаемых целей и включать разработку математической модели задачи, исследование модели и нахождение оптимального решения, а также анализ полученных результатов. Решение необходимо получить на основе применения методов оптимизации. При транспортной деятельности решения могут приниматься на основе логистических подходов.

В данной работе в качестве примера реализации такого подхода рассмотрена задача оптимального распределения материальных ресурсов, направляемых на ликвидацию последствий ЧС ТХ.

Пусть имеется m складов хранения n материальных ресурсов, необходимых для ликвидации последствий ЧС ТХ. Ставится задача составления математической модели распределения этих ресурсов по пунктам назначения с последующей ее реализацией [2-5].

Введем следующие обозначения: i – номер склада; j – номер материального ресурса; q_{ij} – количество j – ресурса в i – складе, штук; p_{ij} – стоимость доставки j – ресурса с i – склада в место аварии, тенге; d_j – потребность в j – ресурсе при ЧС ТХ, штук; t_i – время доставки ресурсов в i – пункт, час; f_j – допустимое время доставки j – ресурса, час; x_{ij} – определяемое необходимое количество j – ресурса с i – склада, штук.

При этом должны выполняться следующие ограничения: для всех значений i, j имеет место

$$x_{ij} \leq q_{ij} \text{ и } \sum_i x_{ij} = d_j . \quad (1)$$

Учитывая эти ограничения, в первом приближении целевая функция будет иметь следующий вид:

$$\sum_{i,j} p_{ij} x_{ij} \rightarrow \min . \quad (2)$$

Это означает, что затраты, необходимые для доставки материальных ресурсов, должны быть минимальными. Из рисунка видно, что всевозможные доставки из i – склада j – материального ресурса могут осуществляться $I \times J$ способами. Кроме того, если заранее известно, что в каком-то складе некоторого материального ресурса нет, то принимается $q_{ij}=0$.

Задача состоит в том, чтобы минимизировать функцию (2) при ограничениях (1). Рассмотрим данную задачу в наиболее общей постановке, т.е. для нескольких пунктов распределения. Транспортная таблица для данной задачи приведена в таблице 1.

Табл. 1. Транспортная таблица для задачи в общей постановке.

Склады	Ресурсы	Центры распределения												Объем	
		B_1				B_2				B_r					
		M_1	M_2		M_n	M_1	M_2	...	M_n	M_1	M_2		M_n		
A_1	M_1	$p_{11}^{(1)}$	M		M	$p_{11}^{(2)}$	M	...	M		$p_{11}^{(r)}$	M		M	q_{11}
	M_2	M	$p_{12}^{(1)}$		M	M	$p_{12}^{(2)}$	...	M		M	$p_{12}^{(r)}$		M	q_{12}

	M_n	M	M		$p_{1n}^{(1)}$	M	M	M	$p_{1n}^{(2)}$		M	M		$p_{1n}^{(r)}$	q_{1n}
A_2	M_1	$p_{21}^{(1)}$	M		M	$p_{21}^{(2)}$	M	...	M		$p_{21}^{(r)}$	M		M	q_{21}
	M_2	M	$p_{22}^{(1)}$		M	M	$p_{22}^{(2)}$	...	M		M	$p_{22}^{(r)}$		M	q_{22}

	M_n	M	M		$p_{2n}^{(1)}$	M	M	M	$p_{2n}^{(2)}$		M	M		$p_{2n}^{(r)}$	q_{2n}
...	
Спрос		$d_1^{(1)}$	$d_2^{(1)}$		$d_n^{(1)}$	$d_1^{(2)}$	$d_2^{(2)}$	...	$d_n^{(2)}$		$d_1^{(r)}$	$d_2^{(r)}$		$d_n^{(r)}$	

Табл. 2. Транспортные таблицы по видам материальных ресурсов (на примере ресурса M_i).

Склады	Центры распределения				Объем производства
	B_1	B_2	...	B_r	
A_1	$p_{1i}^{(1)}$	$p_{1i}^{(2)}$	...	$p_{1i}^{(r)}$	q_{1i}
A_2	$p_{2i}^{(1)}$	$p_{2i}^{(2)}$	...	$p_{2i}^{(r)}$	q_{2i}
...
A_m	$p_{mi}^{(1)}$	$p_{mi}^{(2)}$	...	$p_{mi}^{(r)}$	q_{mi}
Спрос	$d_i^{(1)}$	$d_i^{(2)}$	...	$d_i^{(r)}$	

В данной таблице перевозок некоторые маршруты недопустимы, поскольку в данной постановке задачи ресурсы не могут заменить друг друга. Например, нельзя осуществлять перевозки из пункта хранения материалов марки M_1 в пункт доставки товаров модели M_2 . В данной таблице запрещенным маршрутам соответствует очень высокая стоимость M ($p_{ij} = M$).

Для того чтобы учесть многопродуктовый характер задачи, изменим транспортную модель следующим образом: разобьем склады на несколько пунктов расположения в соответствии с числом моделей ресурсов, хранимых в этом складе. Аналогично поступим и с пунктом назначения, т.е. будем считать, что каждый пункт назначения состоит из m подпунктов, соответствующих m моделям ресурсов. В результате получим $m \times n$ исходных пунктов и n пунктов назначения. Представим данные в виде транспортных матриц (таблица 2).

Схематически данную задачу в общем виде можно представить в следующем виде (см. рисунок):

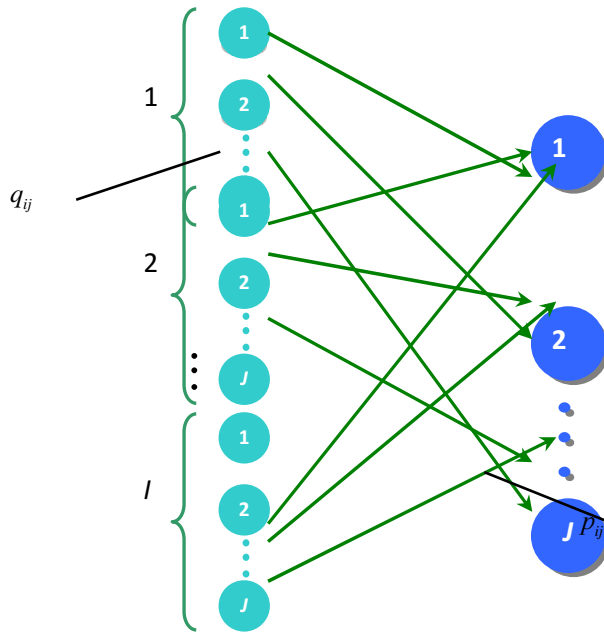


Схема сбора необходимых материальных ресурсов из складов для ликвидации ЧС ТХ.

Рассмотрение этих n моделей дает решение, совпадающее с оптимальным решением задачи, соответствующей первоначальной таблице. С вычислительной точки зрения небольшие подзадачи решить существенно эффективнее, чем одну сложную задачу. Возможность разбиения таблицы на части обусловлена полной независимостью различных товаров. В результате деления первоначальной таблицы получили n – однопродуктовых транспортных задач. В случае незамкнутости одной из моделей добавляется фиктивный склад или пункт приема.

Введем дополнительные коэффициенты.

Пусть c_i – емкость транспортного канала, который соединяет i – пункт с местом аварий, т.е. транспортная возможность каждого пункта (ед.), l_j – занимаемое место в единице транспорта одним j – ресурсом. Тогда должно выполняться следующее дополнительное ограничение:

$$\sum_j x_{ij} l_j \leq c_i . \quad (3)$$

Для определения количества транспортных рейсов, необходимых для обеспечения d_j потребности, добавим в x_{ij} индекс k x_{ij}^k будет определять необходимое количество j – ресурса с i – склада при k – рейсе. Тогда условия ограничений примут вид:

$$\sum_k x_{ij}^k \leq q_{ij} \text{ для } \forall i, j, \quad (4)$$

$$\sum_k \sum_i x_{ij}^k = d_j \text{ для } \forall j . \quad (5)$$

В эту модель необходимо добавить оптимизационное условие времени, т.е. условие для минимизации промежутка времени, необходимое для доставки материальных ресурсов из складов в место ЧС ТХ. Это условие в общем виде можно представить в следующем виде:

$$\max_i (t_i \cdot \text{sign}(x_{ij})) \leq f_j \text{ для любых } j. \quad (6)$$

Функция времени t_i также зависит от k , и будет определяться как

$$t_i^k = t_i(2k-1). \quad (7)$$

Это обусловлено тем, что на время доставки и на следующий рейс также входит время возвращения в склад. Кроме того, должно выполняться условие

$$t_i^k \leq f_j \text{ для } \forall i, j, k \quad (8)$$

или, с учетом (7),

$$t_i^k(2k-1) \leq f_j. \quad (9)$$

Для определения количества осуществляемых рейсов с каждого склада преобразуем формулу (9):

$$k(i, j) = \left\lceil \frac{1}{2} \left(\frac{f_j}{t_i} + 1 \right) \right\rceil, \quad (10)$$

т.е. округление до целого производится в меньшую сторону.

Таким образом, получена следующая задача: минимизировать целевую функцию

$$F = \sum_{i,j} \sum_k^{k(i,j)} p_{ij} x_{ij}^k \quad (11)$$

при следующих ограничениях:

$$\sum_{k=1}^{k(i,j)} x_{ij}^k \leq q_{ij}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{k(i,j)} x_{ij}^k = d_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij}^k l_j \leq c_i, \quad i = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, k(i, j)}, \quad (14)$$

предварительно определив транспортные рейсы каждого склада по формуле (10). Реализацию модели (11)-(14) следует проводить для комплекса исходных данных, с количественными показателями по материальным ресурсам, складам, потребностям, транспортным потокам и временным факторам.

Существование и единственность задачи можно обосновать методом работы [1]:

Из общей задачи линейного программирования выделим и исследуем две ее подкласса: каноническую задачу

$$\langle c, u \rangle \rightarrow \inf; \quad u \in U = \{u \in E^n : u \geq 0, Au = b\} \quad (15)$$

и основную задачу

$$\langle c, u \rangle \rightarrow \inf; \quad u \in U = \{u \in E^n : u \geq 0, Au \leq b\}, \quad (16)$$

здесь c, b – заданные векторы, $c \in E^n, c \neq 0, u \in E^m, A$ – матрица размера $m \times n, A \neq 0$. Несмотря на внешнее различие задач (15) и (16), эти задачи, оказывается, в определенном смысле эквивалентны. В самом деле, если ограничения типа равенств $Au = b$ заменить на равносильную систему двух неравенств: $Au \leq b, Au \geq b$, то каноническую задачу (15) можно записать в виде основной задачи

$$\langle c, u \rangle \rightarrow \inf; \quad u \in U = \{u \in E^n : u \geq 0, Au \leq b, -Au \leq b\}. \quad (17)$$

Ясно, что задачи (15)-(17) эквивалентны, т.е. всякое решение задачи (15) является решением задачи (17) и наоборот. Теперь достаточна ссылка на следующие теоремы:

Теорема 1. Для того чтобы каноническая задача была разрешима, т.е. существовала точка $u_* \in U$ такая, что $\langle c, u_* \rangle \rightarrow \inf_U \langle c, u \rangle > -\infty$, необходимо и достаточно, чтобы: 1) множество U было непустым; 2) функция $J(u) = \langle c, u \rangle$ была ограничена снизу.

Теорема 2. Если каноническая задача разрешима, то среди ее решений найдется хотя бы одна угловая точка множества U .

Реализация модели (1-4) может быть осуществлена по методам [2-5].

Подготовка исходных данных для реализации основной математической модели (1-14) является самостоятельной задачей. Так, транспортные таблицы 1,2 по видам материальных ресурсов содержат массивы данных, которые должны быть определены и уточнены. Целесообразно такую работу провести в предупреждающем режиме, т.е. по наиболее вероятным сценариям ЧС ТХ должны создаваться базы данных по СДЯВ, часто применяемым веществам, растворам и техническим средствам для дегазации, транспортным средствам, товарам для жизнеобеспечения, людским ресурсам и т.д. К примеру, для расчета размеров возможной зоны заражения можно использовать существующие методики и программы [6,7].

Необходимо отметить, что все параметры, входящие в исходную математическую модель, имеют ясный химический, физический, экономический или иной смысл, их значения должны вводиться в

создаваемые алгоритмы и компьютерные программы, реализующие математическую модель. Однако, на данном этапе все параметры имеют условный характер, с указанием границ возможных значений. Исследованы вопросы существования и единственности решения основной задачи линейного программирования. При использовании вышеназванной модели предусматривается ввод в программу реальных значений параметров зоны заражения, полученных по расчету с использованием программы [7].

Литература

1. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1985. 545с.
2. Логистика и бизнес. Сборник материалов конференции «Логистика в современных условиях развития экономики РФ». М.: БРАНДЕС, 1997.
3. Гаджинский А.М. Основы логистики. М.: ИВЦ МАРКЕТИНГ, 1997.
4. Миротин Л.Б. Логистика интегрированных цепочек поставок. М.: Экзамен, 2003. 256 с.
5. Гордон М.П. Проблемы комплексного управления товародвижением в материально-техническом снабжении. М.: НИИМС, 1993.
6. Методика прогнозирования и оценки химической обстановки при аварии на химически опасном объекте и на транспорте. Утверждена приказом Министра по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан № 427 от 8.12.2010 г.
7. Исмаилов Б.Р., Шарафиев А.Ш. и др. Расчет параметров возможной зоны заражения при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. Компьютерная программа. Свидетельство о защите интеллектуальной собственности. № 394. 12.12.2010 г. МЮ РК.

Математические модели распространения инфекционных заболеваний

Л. Кадена

Сибирский федеральный университет, Красноярск

Исторически сложилось, что инфекционные болезни стали серьезной угрозой для общества. На протяжении большей части двадцатого века пандемии (эпидемии, которые распространяются через районы огромных размеров и численности населения) рассматривались как угроза в прошлом, современная медицина избавила человечество навсегда от чумы, оспы и других инфекционных бедствий. Тем не менее, современные экологические трансформации привели к определенным изменениям в географическом распределении опасных организмов в целом и паразитов, в частности. Соппротивление их антимикробным препаратам также стало серьезной проблемой.

Д. Алемберт (D Alembert, XVIII век) был первым, кто описал распространение инфекционных заболеваний на основе математической модели. Тем не менее, первая известная статья, которая включает в себя модели для описания распространения инфекционного заболевания, появилась в 1760 году. Статья была опубликована Даниилом Бернулли (1700-1782) в трудах Швейцарской национальной академии, в которой объединялись его медицинские знания и математика. Бернулли предложил несколько математических моделей с помощью дифференциальных уравнений для моделирования распространения некоторых инфекционных заболеваний. Эти результаты представляют интерес и в настоящее время, поскольку принцип использования математических методик для исследования и оценки альтернативных мер обеспечения безопасности в здравоохранении сохраняется сегодня, как и 200 лет назад.

Построение математических моделей является одним из эффективных инструментов, используемых сегодня для изучения проблем в медицине, биологии, физиологии, биохимии, эпидемиологии, фармакокинетики и других областях знания, решения этих основные задачи служат для описания, объяснения и прогнозирования явлений и процессов в указанных предметных областях.

При решении проблем медицинского мониторинга используются два типа математических моделей: детерминированные и стохастические. В детерминированной модели контролируются факторы, связанные с характером процесса или явления и, следовательно, можно точно предсказать результаты. В стохастической модели не могут контролировать факторы, связанные с этим явлением и, следовательно, они производят отдельные результаты – исходы испытаний.

В стандартной эпидемиологической модели выдвигается предположение, что люди находятся в одном из нескольких возможных состояний. В зависимости от этих условий, население может быть включено в несколько определенных категорий: восприимчивых лиц (S), инфицированных (I) или удаленных (R), и так далее. В настоящее время существуют модели SI, SIS и SIR, которые могут описывать как детерминированные или стохастические состояния, т.е. предположить, что взаимодействие между людьми является случайным. В работе детально описано применение каждой из указанных моделей для реалистичных ситуаций распространения опасных инфекционных заболеваний.

Использование математических моделей для моделирования распространения инфекционных заболеваний выросло в значительной степени в последние годы, поскольку они предоставляют полезную информацию для принятия решений, а также для разработки оперативных мер в системах контроля и ликвидации инфекционных заболеваний. Эти модели являются полезными, поскольку они описывают существенные свойства процесса распространения заболевания, хотя и в упрощенной форме. Кроме того, путем изменения параметров модели может быть представлены или обнаружены ситуации, которые трудно получить из лабораторного эксперимента. Таким образом, математическое моделирование позволяет определить распространенность и величины заболеваемости, а также предоставляет количественные обоснования для получения объективных решений в сфере управления и подавления распространения инфекционных заболеваний.

Мониторинг распространения парниковых газов в Сибирском регионе на основе усвоения данных наблюдений

Е.Г. Климова, Н.В. Киланова

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Под мониторингом состояния окружающей среды принято понимать комплексную систему наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Традиционная сеть метеорологических наблюдений включает в себя наземные (синоптические), аэрологические (радиозонды) данные, данные спутникового зондирования, поступает также информация с кораблей и самолетов. В последнее время большое количество информации дают радарные наблюдения. Мониторинг состояния окружающей среды помимо сбора и хранения больших массивов данных наблюдений включает в себя также обработку данных наблюдений для получения распределения интересующих нас полей в пространстве и времени. Современное исследование окружающей среды включает в себя моделирование процессов с привлечением математических моделей прогноза погоды и климата, а также моделей распространения изучаемых веществ в атмосфере.

Оценка состояния окружающей среды по данным наблюдений производится с привлечением прогностических моделей на основе систем усвоения данных. Под усвоением данных («data assimilation») принято понимать совместный учет данных и модели для наиболее точной оценки пространственно-временного распределения исследуемых величин. В настоящей статье представлены предварительные результаты работы по созданию системы усвоения данных о парниковом газе CO_2 на территории Сибири и проведению численных экспериментов с модельными данными.

Система усвоения данных основана на региональной модели переноса и диффузии пассивной примеси в z - системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + u \frac{\partial s}{\partial x} + v \frac{\partial s}{\partial y} + (w - \tilde{\omega}_s) \frac{\partial s}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k_1 \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_2 \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3 \frac{\partial s}{\partial z} \right) + f, \\ s &= s_0 \quad \text{при } t = 0, \\ s &= s_0 \quad \text{при } x = 0 \text{ или } x = X, y = 0 \text{ или } y = Y, \\ k_3 \frac{\partial s}{\partial z} &= \alpha (s - s_0) \quad \text{при } z = h, \\ k_3 \frac{\partial s}{\partial z} &= 0 \quad \text{при } z = Z, \end{aligned}$$

где x, y - горизонтальные координаты, z - высота над уровнем моря, $s(x,y,z,t)$ - концентрация примеси в точке с координатами (x,y,z) в момент времени t , $\mathbf{V}=(u,v,w)$ - вектор скорости ветра с компонентами в направлениях x, y, z соответственно, $\tilde{\omega}_s(x,y,z,t)$ - скорость гравитационного оседания примеси, k_1, k_2 - коэффициенты турбулентного обмена в горизонтальном и k_3 - вертикальном направлениях, $f(x,y,z,t)$ - функция, описывающая размещение и мощность источников, $s_0(x,y,z,t)$ - концентрация примеси на подстилающей поверхности, h - высота приземного слоя, параметр α характеризует взаимодействие атмосферы с подстилающей поверхностью. Задача рассматривается в области $D_t = G \times [0, T]$, где $G = \{0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, h \leq z \leq Z\}$; $0 \leq t \leq T$ - интервал времени.

Приведенная выше задача решается методом расщепления по физическим процессам [20]. Тогда на каждом шаге по времени последовательно решаются задача переноса примеси по траекториям и задача турбулентной диффузии. При решении задачи переноса примеси по траекториям используется полулагранжева схема сохраняющая массу и монотонность решения [2]. Задача турбулентной диффузии аппроксимируется по схеме Кранка – Николсона. К полученному разностному уравнению применяется метод расщепления по направлениям, для решения системы разностных уравнений используется метод факторизации.

Вычисления метеорологических параметров, определяющих динамику переноса, проводится по мезомасштабной модели WRF (Weather Research and Forecast) [21].

Для оценки полей концентрации в работе используется алгоритм усвоения данных, основанный на теории оптимальной фильтрации Калмана. Описание алгоритма фильтра Калмана можно найти в [5,8,9,10, 13-15].

Предположим, что модель переноса и диффузии пассивных газовых составляющих в атмосфере в дискретном по времени и пространству виде записывается следующим образом

$$x_k = A_{k-1} x_{k-1}, \quad (1)$$

где x_k - n -вектор прогнозируемых значений концентрации примеси в момент времени t_k , его размерность равна количеству узлов сетки: $n = n_x n_y n_z$, где n_x - количество узлов сетки по направлению x , n_y - по направлению y , n_z - по вертикали.

Пусть "истинное" значение концентрации в момент времени t_k описывается векторным уравнением

$$x_k^f = A_{k-1} x_{k-1}^f + \varepsilon_{k-1}^f,$$

где ε_k^f - случайный вектор "шумов" модели, удовлетворяющий условиям

$$E \varepsilon_k^f = 0,$$

$$E(\varepsilon_k^f)(\varepsilon_l^f)^T = Q_k \delta_{kl}.$$

Вектор данных наблюдений представим в виде

$$y_k^o = M_k x_k^f + \zeta_k^o, \quad (2)$$

где y_k^o - m -вектор наблюдений в момент времени t_k , M_k - $(n \times m)$ матрица, ζ_k^o - случайный m -вектор ошибок наблюдений, удовлетворяющий условиям

$$E \zeta_k^o = 0, \quad E(\zeta_k^o)(\zeta_l^o)^T = R_k \delta_{kl}, \quad E(\zeta_k^o)(\varepsilon_l^f)^T = 0.$$

Оптимальная оценка концентрации x_k^a по данным наблюдений (2) и модели переноса и диффузии примеси (1) ищется из условия минимума следа матрицы ковариаций ошибок оценивания. Решением этой задачи является алгоритм фильтра Калмана [7]:

$$x_k^f = A_{k-1} x_{k-1}^a, \quad (3)$$

$$P_k^f = A_{k-1} P_{k-1}^a A_{k-1}^T + Q_{k-1}, \quad (4)$$

$$K_k = P_k^f M_k^T (M_k P_k^f M_k^T + R_k)^{-1}, \quad (5)$$

$$P_k^a = (I - K_k M_k) P_k^f, \quad (6)$$

$$x_k^a = x_k^f + K_k (y_k^o - M_k x_k^f), \quad (7)$$

$$P_k^f = E(x_k^f - x_k^a)(x_k^f - x_k^a)^T, \quad P_k^a = E(x_k^a - x_k^f)(x_k^a - x_k^f)^T.$$

Здесь x_k^f - прогноз концентрации по модели, x_{k-1}^a - искомая оценка, которая была получена на $(k-1)$ -м шаге по времени. Оценка x_{k-1}^a называют оценкой анализа, P_k^f, P_k^a - матрицы ковариации ошибок прогноза и анализа, соответственно, K_k - весовая матрица. Таким образом, алгоритм фильтра Калмана состоит из шага прогноза, когда по прогностической модели вычисляются предварительная оценка концентрации по формуле (3) и рассчитываются матрицы ковариации ошибок прогноза по (4). Затем вычисляется весовая матрица K_k по формуле (5). И далее следует шаг анализа, который заключается в получении непосредственно искомой оценки анализа по (7) и матрицы ковариации ошибок анализа по формуле (6).

В моменты времени, когда наблюдения недоступны, считаем, что оценка совпадает с прогнозом по модели, а матрица ковариации ошибок анализа равна матрице ковариации ошибок прогноза.

Реализация алгоритма фильтра Калмана на ЭВМ в полной постановке весьма затруднительна, так как для современных прогностических моделей порядок ковариационных матриц может превышать 10^6 . Одним из способов решения этой проблемы является использование упрощенных моделей для расчета матриц ковариаций ошибок прогноза. Такой алгоритм называют субоптимальным алгоритмом фильтра Калмана [15,17].

В настоящей работе используется алгоритм усвоения данных, основанный на предположении об эргодичности полей случайных ошибок прогноза концентрации. В этом случае ковариационную матрицу ошибок прогноза вместо вычисления по формуле (4) можно вычислять следующим образом

$$P_k^f = \overline{\Delta x_k (\Delta x_k)^T} \cong \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta x_i (\Delta x_i)^T. \quad (8)$$

Здесь черта сверху обозначает осреднение по времени. Смысл формулы (8) заключается в том, что вероятностное осреднение заменяется осреднением по времени.

Проведены предварительные численные эксперименты по оценке концентрации углекислого газа для региона (48.9 °с.ш., 85.9 °в.д.; 75.3 °с.ш., 130 °в.д.). Расчеты осуществлялись на сетке 100×174 узла по горизонтали (направления x и y соответственно в декартовой системе координат), 15 уровней по вертикали. Шаг сетки по горизонтали при этом составил 18 км. Начальное распределение CO_2 было взято с сайта Европейской программы GMES [6,22] для 00 часов 01 июня 2006 года. Для проведения численных экспериментов производилась интерполяция данных на расчетную сетку. На рис.1 приведено начальное распределение концентрации CO_2 на высоте 1200 м над уровнем моря. По оси абсцисс отложена долгота местности в градусах, по оси ординат – широта.

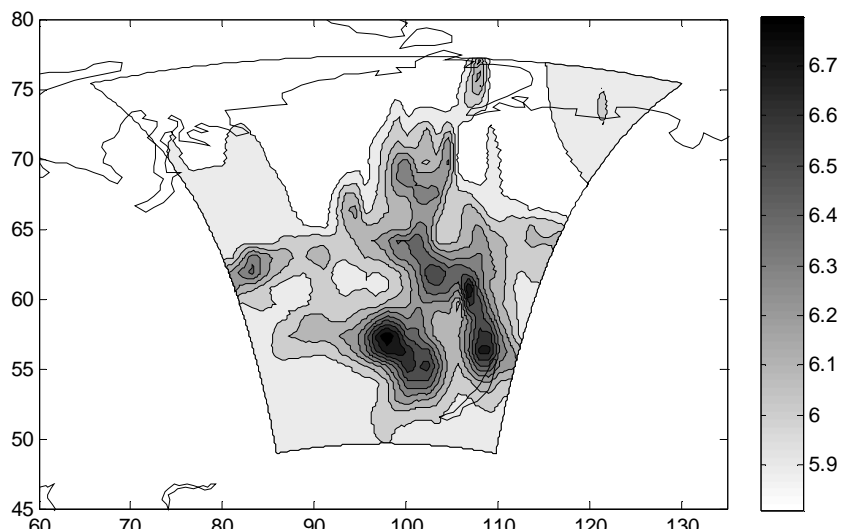


Рис. 1. Начальное распределение концентрации CO_2 на высоте 1200м ($\cdot 10^{-4}$ кг/кг)/

С использованием описанного алгоритма усвоения данных была получена оценка изменения углекислого газа в течение суток расчетного времени. Считалось, что каждые 6 часов имеются данные наблюдений (в проведенных численных экспериментах они моделировались). На рис. 2 приведены поля концентрации CO_2 на высоте 1200 м через 12 часов и через 24 часа расчетного времени, то есть на моменты времени 12:00 01.06.2006г. и 00:00 02.06.2006г.

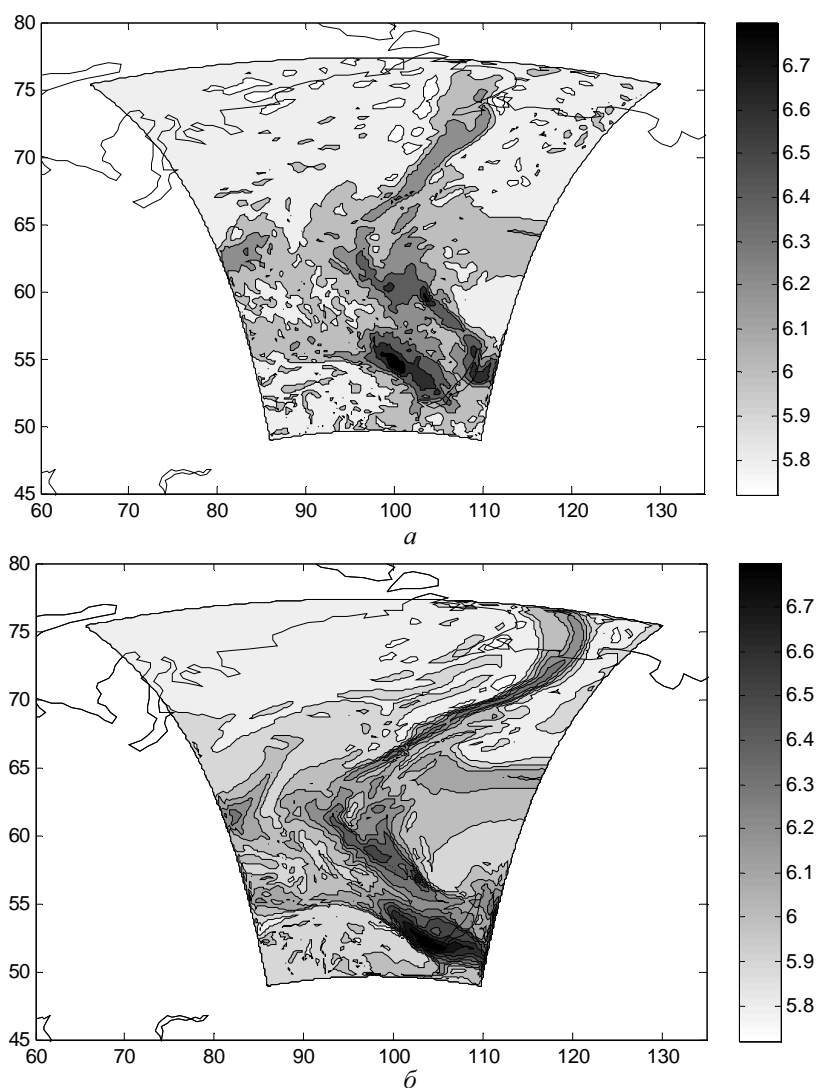


Рис. 2. Распределение концентрации CO_2 на высоте 1200 м через 12 часов (а) и через 24 часа (б) расчетного времени ($\cdot 10^{-4}$ кг/кг).

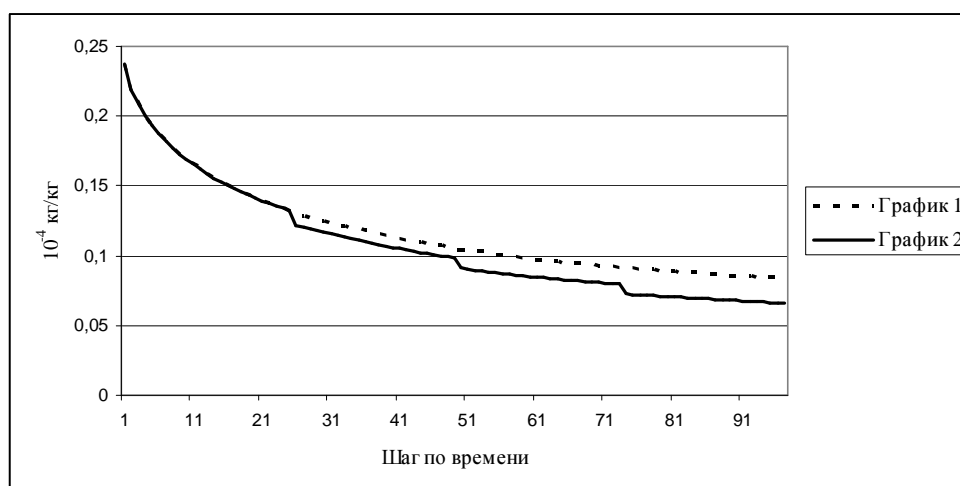


Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка оценки концентрации CO_2 ($\cdot 10^{-4}$ кг/кг), полученная без процедуры усвоения данных (график 1) и та же величина, полученная с помощью представленной системы усвоения данных (график 2).

В ходе вычисления распределения концентрации CO_2 получена оценка среднеквадратической ошибки решения и проведено сравнение с величиной среднеквадратической ошибки оценки концентрации, полученной без проведения процедуры усвоения данных.

На рис. 3 по оси абсцисс отложены шаги по времени, по оси ординат – величина среднеквадратической ошибки. Видно, что оценка концентрации, полученная с применением системы усвоения данных, дает более точное решение, чем без применения таковой.

В статье приведены предварительные результаты работы по созданию системы усвоения данных о CO_2 . В дальнейшие планы по данной работе входит переход к η - системе координат в модели переноса и диффузии примеси. Эта система определяется через гидростатическую составляющую давления, она позволит автоматически учитывать топографию подстилающей поверхности.

Таким образом, создание систем усвоения данных является одной из составных частей задачи мониторинга состояния окружающей среды. Разработка системы усвоения данных современного уровня для решения задачи восстановления даже одного отдельного компонента, к примеру, парникового газа CO_2 , требует объединения усилий групп специалистов, работающих в различных направлениях [1,3,4,11]. В ИВТ СО РАН нами начата работа по созданию такой системы усвоения данных о пассивных газовых составляющих для Сибирского региона. Работа основана на опыте исследований в области усвоения метеорологических данных [15-18], а также в области моделирования состояния окружающей среды [12-14].

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований СО РАН на 2010-2012 гг. (проект № IV.31.2.1), Программы междисциплинарных интеграционных исследований СО РАН на 2009-2011 гг. (проект № 4) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-07-00103-а).

Литература

1. Baker D.F. et al. Variational data assimilation for atmospheric CO_2 // *Tellus*. 2006. 58B. P. 359-365.
2. Bermejo R., Conde J. A Conservative Quasi-monotone semi-Lagrangian Scheme // *Mon. Wea. Rev.* 2002. Vol. 130. P. 423-430.
3. Chevallier F. et al. AIRS-based versus flask-based estimation of Carbon surface fluxes // *Journal of Geophysical Research*. 2009. Vol. 114. D20303. P. 1-9.
4. Feng L. et al. Estimating surface CO_2 fluxes from space-borne CO_2 dry air mole fraction observations using an ensemble Kalman filter // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. N 8. P. 2619-2633.
5. Ghil M., Malanotte-Rizzolli P. Data assimilation in meteorology and oceanography // *Advances in Geophysics*. 1991. Vol. 33. P. 141-266.
6. Hollingsworth A. et al. Toward a monitoring and forecasting system for atmospheric composition. The GEMS Project // *Bulletin of American Meteorological Society*. 2008. N 8. P. 1147-1164.
7. Jazwinski A.H. Stochastic processes and filtering theory. N.-Y.: Acad. Press, 1970. 377 p.
8. Kalnay E. Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge Univ. Press, 2002.
9. Menard R., Cohn S.E., Chang L.-P., Lyster P.M. Assimilation of stratospheric chemical tracer observations using a Kalman filter. Part 1: Formulation // *Mon. Wea. Rev.* 2000. Vol. 128. P. 2654-2671.
10. Menard R., Chang L.-P. Assimilation of stratospheric chemical tracer observations using a Kalman filter. Part 2: χ^2 -validated results and analysis of variance and correlation dynamics // *Mon. Wea. Rev.* 2000. Vol. 128. P. 2672-2686.

11. Peters W. et al. An ensemble data assimilation system to estimate CO₂ surface fluxes from atmospheric trace gas observations // *Journal of Geophysical Research*. 2005. Vol. 110. D24304. P. 1-18.
12. Дубровская О.А., Климова Е.Г. Прогнозирование распространения дымовых аэрозолей на территории Сибири // *Вычислительные технологии*. 2007. Т. 12, № 5. С. 68-77.
13. Киранова Н.В., Климова Е.Г. Численные эксперименты по оценке систематической ошибки модели в задаче усвоения данных о концентрации пассивной примеси // *Вычислительные технологии*. 2006. № 5. С. 32-40.
14. Климова Е.Г., Киранова Н.В. Численные эксперименты по оценке эмиссии метана на основе системы усвоения данных о пассивной примеси в атмосфере Северного полушария // *Оптика атмосферы и океана*. 2006. № 11. С. 961-964.
15. Климова Е.Г. Численные эксперименты по усвоению метеорологических данных с помощью субоптимального фильтра Калмана // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 10. С. 54-67.
16. Климова Е.Г. Метод усвоения данных наблюдений, основанный на применении π -алгоритма // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 3. С. 16-26.
17. Климова Е.Г. Метод усвоения данных наблюдений, основанный на ансамблевом π -алгоритме // *Метеорология и гидрология*. 2008. № 9. С. 45-53.
18. Климова Е.Г., Киранова Н.В., Дубровская О.А., Зарипов Р.Б. Исследование статистической структуры ошибок краткосрочного прогноза температуры в атмосферном пограничном слое для целей объективного анализа // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 9. С. 26-34.
19. Климова Е.Г. Использование ансамблевого фильтра Калмана при планировании дополнительных наблюдений // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 8.
20. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
21. www.mmm.ucar.edu/research_mmm/data_assim/index.php
22. <http://www.gmes-atmosphere.eu/data>

Применение регрессионных моделей для описания многолетнего эпизоотического процесса (Каргинский участок Тувинского природного очага чумы)

Н.А. Кол¹, А.Ф. Чульдум¹, М.Г. Ростовцев²

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл

² ФГУЗ Тувинская противочумная станция Роспотребнадзора, Кызыл

Тувинский природный очаг чумы (ТПОЧ) характеризуется практически ежегодными эпизоотиями [2] – имеет индекс эпизоотичности¹, равный 0,9 [12]. В связи с опасностью для населения, которую представляет данные эпизоотии, для Тувы остается актуальной проблема прогнозирования активности очага.

Для эффективного прогнозирования эпизоотического процесса требуется создать адекватную этому природному процессу математическую модель. По определению математическая модель это – “приближенное описание какого-либо класса явлений внешнего мира, выраженное с помощью математической символики. Математическое моделирование – мощный метод познания внешнего мира, а также прогнозирования и управления. Анализ математической модели позволяет проникнуть в сущность изучаемых явлений” [1].

Подходы к созданию модели зооноза с известной долей условности и приближения можно разделить на пространственные и временные. И в том и в другом случае исследуются изменения эпизоотий чумы во времени, только при пространственном подходе изучается динамика эпизоотий чумы во времени и в пространстве.

Пространственный подход был применен авторами при исследовании динамики эпизоотий внутри Каргинского мезоочага в работе [7]. В свою очередь “временными прогнозами эпизоотий и эпидемий занимались многие исследователи. В работе [10] показана связь эпизоотий чумы с атмосферной циркуляцией и активностью Солнца. Другими климатическими показателями, влияние которых на активность очагов чумы доказана, могут быть увлажненность предшествующего летнего периода [13], ветровой режим [3]. В работе [4] приводятся модели краткосрочных и долгосрочных прогнозов, основанных на анализе большого количества биотических и абиотических факторов.” [6] Ранее авторами была разработана модель хода сезонного эпизоотического процесса [8], которая позволяет предсказать средний уровень результативности по поиску чумы в ТПОЧ на каждый календарный день периода обследования.

В данной работе исследуется временной ряд суммы количества культур чумы, собранных за год - далее временной ряд активности эпизоотий чумы в Каргинском мезоочаге ТПОЧ за период с 1966 по 2000 гг.

Для описания временного ряда активности мезоочага были рассмотрены линейные множественные регрессионные модели с дополнительными факторами - среднемесячными температурой и количеством осадков.

Материалы и методы

Материалами для исследования эпизоотий послужили суммарные ежегодные значения количества выявленных культур чумы из Базы Данных «Культуры чумы в Каргинском мезоочаге ТПОЧ». БД была составлена на основе работ Тувинской противочумной станции. Материалы по климатическим условиям были представлены среднемесячным количеством осадков в миллиметрах с 1962 года по 2000 г. и значением среднемесячных температур в градусах Цельсия с 1963 по 2000 г., зафиксированных в пос. Мугур-Аксы сотрудниками метеорологической службы. Исследование было ограничено 2000 годом, так как в наличии у нас имеются климатические данные только до этого года.

При построении регрессионной модели использовались метод «k» лучших признаков [5] и метод пошаговой регрессии (stepwise regression) [9].

Следует также пояснить, что для построения регрессионной модели активности очага методом пошаговой регрессии была использована функция STEPWISE программного продукта MATLAB.

“Решение практических задач восстановления регрессионной зависимости требует рассмотрения большого числа порождаемых признаков. Процедура построения регрессионных моделей состоит из двух шагов. На первом шаге, на основе свободных переменных - результатов измерений, порождается набор признаков. На втором шаге производится выбор признаков. При выборе признаков выполняется настройка параметров модели, оценивается ее качество. Модель с настроенными параметрами, доставляющая минимум заданному функционалу качества, в данном случае наименьшее значение выражения $(1 - R^2)$, где R^2 - значение коэффициента детерминации, называется моделью оптимальной структуры” [11].

¹ Индекс эпизоотичности – отношение числа лет, в течение которых на данной территории регистрировали эпизоотию, к общему числу лет наблюдения.

Результаты и обсуждение

1. Модели на основе метода «к» лучших признаков. “В основе этого метода лежит предположение о статистической независимости анализируемых признаков.” [5]. Имеется в виду корреляция между собой 108-ми параметров: 60-ти параметров среднемесячного количества осадков (12 ежемесячных параметров за 5 лет) и 48-ми параметров среднемесячной температуры (12 ежемесячных параметров за 4 года). “Если в качестве критерия эффективности линейной диагностической модели используется коэффициент детерминации R^2 , то мерой информативности отдельно взятого признака может служить его коэффициент корреляции с критериальным показателем $r(x_i, z)$ (активностью эпизоотий чумы). Исходное множество признаков x_1, \dots, x_p упорядочивается по модулю коэффициента корреляции

$$|r(x_{i_1}, z)| \geq |r(x_{i_2}, z)| \geq \dots \geq |r(x_{i_p}, z)|, \quad (1)$$

и из построенного ряда отбирается «к» первых, наиболее ценных признаков.

Чем строже соблюдается условие независимости отбираемых признаков, тем лучше получается конечный результат.” [5]

В результате применения метода «к» лучших признаков при анализе качества получаемых моделей были отобраны две модели (первая и вторая).

Первая модель включает 7 параметров, в число которых входят данные о среднемесячной температуре и количестве среднемесячных осадков, как предыдущих лет, так и текущего года:

$$Y(t) = 1,17 \cdot O_2^{t-4} + 1,92 \cdot O_{12}^{t-2} + 0,2 \cdot O_4^{t-1} - 2,46 \cdot T_6^{t-3} + 3,25 \cdot T_7^{t-2} + 1,67 \cdot T_4^{t-1} + 0,21 \cdot T_2^t - 72,37, \quad (2)$$

где $Y(t)$ - активность эпизоотий чумы (ежегодное количество найденных культур чумы), O - среднемесячное количество осадков, T - среднемесячная температура, нижний индекс показывает номер месяца в году, в верхнем индексе t - номер года в котором выделены культуры чумы, например, T_4^{t-1} - среднемесячная температура за апрель года, который является предыдущим по отношению к году, в котором выделены культуры чумы.

Вторая модель включает 14 параметров, которые основываются на данных о среднемесячной температуре и количестве среднемесячных осадков только предыдущих лет:

$$Y(t) = 1,28 \cdot O_{12}^{t-4} + 1,9 \cdot O_{12}^{t-2} + 0,07 \cdot O_7^{t-1} - 0,13 \cdot O_{10}^{t-1} + 2,24 \cdot O_2^{t-1} + 1,58 \cdot O_1^{t-1} + 0,31 \cdot O_4^{t-2} - 0,07 \cdot O_6^{t-2} + 0,06 \cdot O_9^{t-3} - 2,45 \cdot T_4^{t-3} + 3,48 \cdot T_6^{t-2} + 1,92 \cdot T_7^{t-1} - 1,57 \cdot T_2^{t-1} - 0,08 \cdot T_{12}^{t-1} - 115,38, \quad (3)$$

При практическом использовании отрицательные значения получаемых модельных функций, как не имеющие физического смысла, заменяются нулевыми.

Коэффициент детерминации наблюдаемого ряда и первой модели $R^2 = 0,77$, второй модели 0,86. Статистический смысл коэффициента детерминации заключается в том, что он показывает, какая доля зависимой переменной объясняется построенной функцией регрессии. В нашем случае, при коэффициентах детерминации 0,77 и 0,86 регрессионные модели объясняет 77% и 86 % дисперсии критериального показателя соответственно, остальные же 23% и 14% считаются обусловленными факторами, не отраженными в модели.

2. Модели с применением метода пошаговой регрессии (модели stepwise regression). Среди методов отбора признаков широкое распространение получил шаговый метод, впервые предложенный в 1960 году Эфроимсоном. На каждом шаге признаки проверяются на возможность добавления признаков в модель или удаления из модели, основываясь на F -статистике.

Цель шаговой регрессии состоит в отборе из большого количества предикатов небольшой подгруппы переменных, которые вносят наибольший вклад в вариацию зависимой переменной” [9].

В результате применения метода stepwise regression (по-шаговая регрессия) при анализе качества получаемых моделей были нами отобраны две модели (третья и четвертая).

Третья модель включает 7 параметров, в число которых входят данные о среднемесячной температуре и количестве среднемесячных осадков, как предыдущих лет, так и текущего года:

$$Y(t) = 2,49 \cdot O_2^{t-1} + 1,83 \cdot O_{12}^{t-2} + 1,42 \cdot O_{12}^{t-4} - 4,47 \cdot T_4^t - 5,21 \cdot T_6^{t-1} - 3,32 \cdot T_7^{t-1} - 3,46 \cdot T_4^{t-3} - 40,76, \quad (4)$$

где $Y(t)$ - активность эпизоотий чумы (ежегодное количество найденных культур чумы), O - среднемесячное количество осадков, T - среднемесячная температура, нижний индекс показывает номер месяца в году, в верхнем индексе t - номер текущего года, например, O_2^{t-1} - среднемесячное количество осадков за февраль года, который является предыдущим по отношению к году, в котором выделены культуры чумы.

Четвертая модель включает 14 параметров, которые основываются на данных о среднемесячной температуре и количестве среднемесячных осадков только предыдущих лет:

$$Y(t) = 2,21 \cdot O_1^{t-1} + 1,94 \cdot O_2^{t-1} + 1,05 \cdot O_4^{t-1} - 0,99 \cdot O_5^{t-1} - 0,12 \cdot O_6^{t-2} + 1,85 \cdot O_{12}^{t-2} + 1,67 \cdot O_4^{t-3} + 1,46 \cdot O_2^{t-4} + 1,64 \cdot O_{12}^{t-4} + 1,07 \cdot T_2^{t-2} + 1,7 \cdot T_3^{t-2} - 2,04 \cdot T_2^{t-3} - 2,5 \cdot T_4^{t-3} + 4,51 \cdot T_6^{t-3} - 82,12. \quad (5)$$

При практическом использовании отрицательные значения получаемых модельных функций, как не имеющие физического смысла заменены нулевыми значениями.

Коэффициент детерминации наблюдаемого ряда и первой модели $R^2 = 0,88$, второй модели $R^2 = 0,98$. В этом случае, при коэффициенте детерминации 0,88 и 0,98 регрессионная модель объясняет 88 и 98%

дисперсии критериального показателя, остальные же 12 и 2% считаются обусловленными факторами, не отраженными в модели.

3. Сравнение моделей подобранных методом stepwise regression (пошаговой регрессии) и методом «к» лучших признаков (Преимущество stepwise regression моделей над моделями k-лучших признаков). При сравнении моделей полученных разными методами следует учесть, что:

- 1) количество параметров первой и второй моделей, полученных методом «к» лучших признаков, равно 7 и 14 соответственно. Количество параметров третьей и четвертой моделей, полученных методом пошаговой регрессии, также равно 7 и 14;
- 2) коэффициенты детерминации R^2 первой и второй моделей, полученных методом «к» лучших признаков, равны 0,77 и 0,86. Коэффициенты детерминации R^2 третьей и четвертой моделей, полученных методом пошаговой регрессии, равны 0,88 и 0,98.

Если для сравнения моделей, полученных двумя методами пошаговой регрессии (stepwise regression) и «к» лучших признаков, использовать коэффициент детерминации, то лучшими следует признать модели составленные методом по-шаговой регрессии.

Возникает вопрос, каким образом при том же количестве параметров модели, подобранные методом пошаговой регрессии, оказались гораздо ближе к описываемому природному процессу зооноза?

Ответ на этот вопрос лежит в сфере поиска наиболее значимых для описания природного процесса параметров модели. Для объяснения этого явления в [11] приводится следующая иллюстрация Х. Гаррета эффективности алгоритма, позволяющего подобрать оптимальный набор параметров модели. Пусть имеется 20 параметров, каждый из которых имеет корреляцию с внешним критерием порядка 0,30. Если эти параметры коррелируют друг с другом на уровне $r(x_i, x_j) = 0,60$, то множественный коэффициент корреляции линейной диагностической модели равняется 0,38, если же $r(x_i, x_j) = 0,30$, множественная корреляция повышается до 0,52. Наконец, при $r(x_i, x_j) = 0,10$ эффективность модели достигает высокого значения 0,79. Этот факт хорошо исследован в теории регрессионного анализа [14]. Он также достаточно понятен на качественном уровне рассуждений, так как “сильная зависимость признаков между собой означает дублирование большей части информации о проявлении диагностируемого свойства у исследуемых объектов” [5].

Скорее всего, при выборе параметров методом «к» лучших признаков» некоторая часть параметров, хотя и имеет высокий по модулю коэффициент корреляции с внешним критерием (см. табл. 1, 2) (наблюдаемым многолетним ходом зооноза), но также она имеет высокую взаимосвязь между собой, что не позволяет этим моделям показать наилучшую эффективность.

Поэтому использованный более сложный метод анализа экспериментальной информации stepwise regression (пошаговой регрессии) позволил выбрать для модели параметры, которые хотя и не имеют наибольшие по модулю коэффициенты корреляции с временным рядом зооноза (см табл .1, 2), но зато и не содержат повторяющуюся информацию о процессах происходящих в данном природном объекте. Следовательно, модели полученные методом пошаговой регрессии заслуженно показывают наилучшую эффективность и близость к природному процессу эпизоотий чумы.

Табл. 1. Коэффициенты корреляции между временными рядами хода эпизоотий (активностью эпизоотий чумы) и среднемесячным количеством осадков (параметрами модели).

Среднемесячное количество осадков (параметр модели)	Метод анализа экспериментальной информации № параметра	«к» лучших признаков		пошаговой регрессии	
		первая	вторая	третья	четвертая
O_{12}^{t-4}	60	0,688	0,688	0,688	0,688
O_{12}^{t-2}	36	0,507	0,507	0,507	0,507
O_7^{t-1}	19	0,494	0,494	–	–
O_{10}^{t-1}	22	–	0,370	–	–
O_2^{t-1}	14	–	0,365	0,365	0,365
O_1^{t-1}	13	–	0,347	–	0,347
O_4^{t-2}	28	–	0,269	–	–
O_6^{t-2}	30	–	0,264	–	0,264
O_9^{t-3}	45	–	0,256	–	–
O_5^{t-1}	17	–	–	–	0,209
O_4^{t-3}	40	–	–	–	0,168
O_4^{t-1}	16	–	–	–	0,79
O_2^{t-4}	50				0,002

Табл. 2. Коэффициенты корреляции между временными рядами хода эпизоотий (активность эпизоотий чумы) и среднемесячной температурой (параметрами модели).

Среднемесячная температура (параметр модели)	Метод анализа экспериментальной информации	«к» лучших признаков		пошаговой регрессии (модели stepwise regression)	
		№ параметра	первая	вторая	третья	четвертая
T_4^{t-3}	100	0,394	0,394	0,394	0,394
T_6^{t-2}	90	0,385	0,385	–	–
T_6^{t-1}	78	0,338	0,338	0,338	–
T_2^t	62	0,259	–	–	–
T_2^{t-1}	74	–	0,249	–	–
T_{12}^{t-2}	96	–	0,237	–	–
T_3^{t-2}	87	–	–	–	0,206
T_2^{t-2}	86	–	–	–	0,111
T_4^t	64	–	–	0,075	–
T_2^{t-3}	98	–	–	–	0,072
T_7^{t-1}	79	–	–	0,008	–
T_6^{t-3}	102	–	–	–	0,001

4. Биологический аспект анализа моделей (поиск биологического смысла модели). Внимательно рассматривая выбор параметров третьей и четвертой моделей из всей последовательности параметров (108 рядов значений: 60 по среднемесячным осадкам и 48 по среднемесячным температурам) можно заметить, что наиболее значимыми для активности эпизоотий являются: из параметров по осадкам – количество осадков в зимние месяцы (два параметра за декабрь и один параметра за февраль в третьей модели); а из параметров по среднемесячной температуре – температура теплого времени года: весны и лета (два параметра за апрель, один за июнь и один за июль в третьей модели).

Позволим себе поделиться догадкой о возможной закономерности в протекании чумного зооноза в Тувинском природном очаге этой инфекции. Можно предположить, что большое количество снега во время холодного периода года служит для наилучшего сохранения теплого микроклимата в норах длиннохвостого суслика основного носителя чумы в ТПОЧ. Это благоприятное условие способствует активизации чумного микроба впоследствии через один, два и даже четыре года. А высокая температура в теплый период наоборот (коэффициенты температурных параметров модели имеют отрицательный знак) не способствуют последующей активности эпизоотий чумы в этом году через один и три года.

Выводы

1. Результаты моделирования показали выраженную зависимость активности эпизоотий в Тувинском природном очаге чумы от климатических условий (среднемесячного количества осадков за текущий, и предыдущие четыре года и температуры за текущий, и предыдущие три года)
2. Полученные множественные линейные регрессионные модели (3, 5) позволят прогнозировать активность течения зооноза на 1 год.
3. Самой близкой из рассмотренных моделей к природному процессу зооноза явилась модель, полученная методом stepwise regression (методом пошаговой регрессии). Эта регрессионная модель (5), объясняет 98% дисперсии критериального показателя, и только остальные 2% считаются обусловленными факторами, не отраженными в модели.
4. Наиболее значимыми для активности эпизоотий являются количество осадков в зимние месяцы и температура теплого времени года: весны и лета.

Литература

1. Большая советская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.
2. Вержутский Д.Б., Окунев Л.П., Попков А.Ф. и др. Методические рекомендации по эпизоотологическому обследованию Тувинского природного очага чумы. Иркутск, 2004. 19 с.
3. Дубянский М.А., Ермилов А.П., Богатырев С.К. и др. О связи эпизоотий чумы в Казахстане с метеорологическими условиями // Пробл. особо опас. инфекций. 1977. Вып. 5 (57). С. 24-29.
4. Дубянский М.А., Кеженбаев А., Степанов В.М. и др. Прогнозирование эпизоотической активности чумы в Приаралье и Кызылкумах. Нукус: Каракалпакстан, 1992. 240 с.
5. Дюк В.А. Компьютерная психодиагностика. СПб.: Изд-во «Братство», 1994. 364 с.
6. Каримова Т.Ю., Неронов В.М. Природные очаги чумы Палеарктики. М.: Наука, 2007. 199 с.

7. Кол Н.А., Калуж Ю.А., Ростовцев М.Г. и др. Использование ГИС-технологий при анализе пространственной динамики Каргинского мезоочага Тувинского природного очага чумы // Геоинформатика. 2008. № 3. С. 11-16.
8. Кол Н.А., Ростовцев М.Г., Чульдун А.Ф. Оптимизация сроков эпизоотологического обследования Каргинского мезоочага Тувинского природного очага чумы // Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. 2008. № 6 (64). С. 25-29.
9. Крымова Е.А., Стрижов В.В. Алгоритмы выбора признаков линейных регрессионных моделей из конечного и счетного множеств //
10. Лавровский А.А. О периодической активности природных очагов чумы и причинах, ее обуславливающих // Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. М.: Наука, 1971. С. 74-80.
11. Белова О.В. Общая психодиагностика. Учебное пособие. Новосибирск: Научно-учебный центр психологии НГУ, 1987. 304 с.
12. Онищенко Г.Г., Федоров Ю.М., Кутырев В.В. и др. Природные очаги чумы Кавказа, Прикаспия, Средней Азии и Сибири. М.: Медицина, 2004. 192 с.
13. Ротшильд Е.В., Ермилов А.П., Даниленко И.Д., Постников Г.В. Многолетняя динамика и связь с погодой эпизоотий чумы среди больших песчанок в Северо-восточном Прикаспии // Пробл. особо опас. Инфекций. 1970. Вып. 6. С. 120-131.
14. Хей Дж. Введение в методы байесовского статистического вывода. М.: Финансы и статистика, 1987. 335 с.

Инженерно-геокриологический мониторинг БАМ: опыт, проблемы, задачи

В.Г. Кондратьев

Забайкальский государственный университет

Байкало-Амурская магистраль, как известно, проходит по территории с особо сложными природными условиями, характеризующимися почти повсеместным распространением вечной мерзлоты и глубокого сезонного промерзания грунтов, что предопределило громадные трудности при изысканиях, проектировании, строительстве и в особенности при эксплуатации железной дороги.

Так, на Восточном участке БАМ, на линии Тында – Ургал уже в первые годы эксплуатации, в феврале, 1992 г. насчитывалось 188 больных и деформирующихся мест земляного полотна общей протяженностью 186,6 км или 19,2% от протяженности линии 965 км [8]. В 2004 г. протяженность больных мест увеличилась до 325,4 км и составляла 34,2 % от всей длины линии. В 2007 г. несмотря на постоянное проведение работ по исправлению пути на линии 192,4 км (20,6% ее протяженности) продолжали деформироваться.

На всем же БАМ от Усть-Кута до Комсомольска-на-Амуре в 1992 г. насчитывалось 4238 больных мест общей протяженностью 1101 км (35% от всей длины магистрали), при этом осадки земляного полотна вследствие деградации многолетнемерзлых грунтов в его основании составляли около 69% [8].

Сразу же после приемки БАМ в постоянную эксплуатацию в 1989 г. потребовались значительные затраты на мероприятия по поддержанию железнодорожного пути в рабочем состоянии: 14,5 млн. руб. в 1990 г. и 31,8 млн. руб. в 1991 г. в ценах 1990 г. Стало очевидным, что традиционный метод стабилизации земляного полотна в условиях БАМ оказался не только затруднительным, но чрезвычайно дорогим: для ликвидации осадков и ремонта пути, уширения земляного полотна вследствие деградации вечной мерзлоты требовалось ежегодная укладка 2-2,5 млн.м³ балласта. Кроме того, для устройства охлаждающей обсыпки откосов насыпей, предложенной Минайловым Г.П., требовался фракционный камень в объеме 3-4 млн. м³ [1]. Необеспеченность эксплуатационной надежности земляного полотна БАМ обусловлена многими причинами, в том числе не учтенными и не контролируемые техногенными изменениями инженерно-геокриологических условий на трассе дороги вследствие недостаточной изученности при изысканиях, несовершенства проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна на многолетнемерзлых грунтах.

Анализ состояния и предложений по совершенствованию геокриологического обеспечения проектирования, строительства и эксплуатации железных дорог в криолитозоне показал, что только глубокое и всестороннее изучение закономерностей формирования и развития мерзлотных условий, систематический контроль их динамики и воздействия на сооружения, своевременное осуществление мер противомерзлотной защиты могут обеспечить устойчивость и надежность БАМ.

Впервые эти выводы были изложены и одобрены в апреле 1987 г. на совещании при гл. инженере БАМ ж.д., в июне 1988 г. они были опубликованы [6]. Указанием Министра путей сообщения СССР № 44 у/сп от 8.02.1988 г., затем Протоколом оперативного совещания при заместителе Министра от 25.07.1988 г. было предписано начальнику БАМ ж.д. разработать и утвердить программу инженерно-геологического и геокриологического обследования «больных» мест земляного полотна на всем протяжении дороги.

Во исполнение этих решений Управление капитального строительства, Управление пути и БАМ ж.д. в октябре 1988 – мае 1990 гг. выдали Мосгипротрансу, как генеральному проектировщику БАМ, задания на инженерно-геокриологическое обследование и мониторинг участков Тында – Ургал, Беркакит – Томмот, Бамовская – Тында, Тында – Беркакит, Усть-Кут – Кунерма, Байкальский тоннель – Чара и Чара – Тында. Заданиями предусматривалось:

1. провести инженерно-геокриологическое обследование для установления реальной мерзлотной обстановки, «больных» мест и причин их возникновения;
2. разработать прогноз изменения мерзлотных условий и появления в связи с этим новых «больных» мест;
3. разработать мероприятия по предотвращению, ослаблению или подавлению неблагоприятных инженерно-геокриологических процессов;
4. разработать программу геокриологического мониторинга – системы натуральных наблюдений за изменением мерзлотных условий в ходе естественной эволюции природы и под воздействием техногенных факторов;
5. разработать предложения по организации и структуре мерзлотной службы БАМ для постоянного контроля обеспечения устойчивости железнодорожных объектов и охраны геокриологической среды, режимных наблюдений за динамикой мерзлотной обстановки, систематического изучения воздействия криогенных процессов на магистраль и оперативной корректировки мероприятий по противомерзлотной защите ее.

Таким образом, для решения первой задачи – инженерно-геокриологического обследования необходимо было с помощью аэрофотосъемки, геофизических исследований, бурения, инженерно-геокриологической съемки, режимных наблюдений, лабораторных и камеральных исследований установить состав, криогенное строение, физико-механические и теплофизические свойства, распространение, температурный режим, условия залегания и мощность сезонно- и многолетнемерзлых и сезонно-талых пород, развитие криогенных процессов и явлений. В результате должны были быть установлены закономерности формирования и развития геокриологических условий в зависимости от геолого-географических факторов, конструктивных и технологических особенностей элементов дороги.

На этой основе, а также используя математическое и физическое моделирование в сочетании с теплотехническими расчетами и режимными наблюдениями необходимо было решить вторую задачу – геокриологическое прогнозирование, целью которого являлось получение научно обоснованного, конкретного в пространстве и времени представления о характере изменений инженерно-геокриологической обстановки вследствие естественных природных процессов и техногенных воздействий при строительстве и эксплуатации магистрали.

Результаты решения этих двух задач необходимо было представить в виде специальных карт, разрезов и таблиц, а также пояснительных записок. Для «больных» и потенциально «больных» участков был выбран масштаб карт 1:1000 – 2000, для остальных – 1:10000 – 20000.

Эти материалы, в свою очередь, явились исходными данными для решения третьей задачи – управления инженерно-геокриологической обстановкой, цель которого – создание оптимальных условий эксплуатации магистрали и охраны природы. Иначе говоря, в неблагоприятных мерзлотных условиях или возможном неблагоприятном их изменении в будущем необходимо целенаправленное изменение мерзлотной обстановки. Принципиальной основой управления мерзлотными условиями являются закономерности их формирования и изменения, выявляемые при мерзлотной съемке и мерзлотном прогнозе. Мероприятия по управлению мерзлотной обстановкой в зависимости от конкретных условий могли быть направлены на понижение или повышение среднегодовой температуры грунтов, уменьшение или увеличение мощности сезонно-талого или сезонно-мерзлого слоя, ослабление пучения и осадки грунтов, а также предотвращения новообразования мерзлоты, термокарста, термоэрозии, солифлюкции, наледей и других криогенных процессов и явлений. Для достижения нужного результата возможны непосредственные воздействия на геолого-географические факторы природной среды, а также конструктивные и технологические мероприятия.

При решении четвертой задачи – геокриологическом мониторинге необходимо было подвергнуть систематическому квалифицированному контролю мерзлотоформирующие геолого-географические и техногенные факторы, температурный режим грунтов, их сезонное оттаивание и промерзание, деградацию и аградацию многолетней мерзлоты, развитие криогенных процессов и воздействие их на железнодорожные объекты. Мониторинговая информация позволила бы проверить достоверность геокриологического прогноза, правильность и эффективность мероприятий по управлению мерзлотной обстановкой, а в случае необходимости откорректировать их или разработать новые.

Концепция создания противомерзлотной защиты БАМ и научно-методическая часть программы исследований были опубликованы (Кондратьев и Королев, 1988б) и докладывались на различных научно-технических конференциях. Программы работ по отдельным участкам БАМ и АЯМ многократно обсуждались и дополнялись в Мосгипротрансе, БАМ ж.д., МПС и Минтрансстрое. Так, в марте 1991 г. научно-технический совет МПС специально рассмотрел вопрос о состоянии земляного полотна БАМ и путях его стабилизации и одобрил программу действий БАМ ж.д. и Мосгипротранса по созданию противомерзлотной защиты БАМ.

Итак, в 1989 г. работы по программе инженерно-геокриологического обследования и мониторинга земляного полотна были начаты на Восточном участке БАМ (Тында – Ургал) и на участке Беркакит – Томмот, в 1990 г. – на участке Бамовская – Тында и в 1991 г. на Центральном (Тында – Чара) и Западном (Чара – Усть-Кут) участках. Из-за финансовых затруднений заказчика – БАМ ж.д. не были начаты работы на участках Тында – Беркакит и Ургал – Постышево.

К выполнению программы исследований были привлечены проектные институты на отдельных участках БАМ: Томгипротранс – на участке Усть-Кут – Кунерма, Сибгипротранс – на участке Байкальский тоннель – Чара, Ленгипротранс – на участке Чара – Тында, а также специализированные научно-исследовательские организации для решения отдельных тематических задач: ТМС, ЦНИИС, МГУ, ВНИИЖТ, ВСЕГИНГЕО, ЧПИ и др.

Почти на весь БАМ (от Усть-Кута до Ургала) и весь АЯМ (от Бамовской до Якутска) был выполнен комплекс летно-съемочных работ с самолета АН-2 с высоты 100-300 м и с самолета ТУ-134 СХА с высоты 3-5 км: телевизионная, тепловизионная и многозональная съемки. Был получен громадный объем информации, например, только спектральных снимков масштаба 1:10000 насчитывалось более двух тысяч. Кроме того на Восточном участке все «больные» и потенциально опасные места были покрыты детальной аэрофотосъемкой, что позволило оперативно составить топопланы, а также детальные мерзлотные карты для разработки противодеформационных мероприятий. При этом использовалась вся имеющаяся информация предыдущих исследований, специально выполнявшихся работ, данные службы эксплуатации БАМ.

Совместный анализ закономерностей пространственной изменчивости инженерно-геокриологических условий с данными по развитию деформаций позволял оценивать состояние земляного полотна по степени его устойчивости. При этом учитывалась активность протекания процессов непосредственно в теле насыпи и в полосе отчуждения и устойчивость грунтов основания, определяемая льдистостью и мощностью многолетнемерзлых толщ, тепловой осадкой при оттаивании, обводненностью и пучинистостью. По этим критериям проводилась оценка состояния земляного полотна (неустойчивое, относительно неустойчивое, потенциально неустойчивое и устойчивое) и показывалось на карте окраской по семафорному принципу: красным, розовым, желтым и зеленым цветами. На карту выносились также типы деформаций земляного полотна.

Инженерно-геокриологические карты наглядно иллюстрировали пространственную изменчивость устойчивости земляного полотна, отражали причинно-следственную связь развития деформаций земляного полотна с мерзлотно-грунтовыми условиями, позволяли сократить объем обследовательских работ на деформирующихся участках, а также выявить потенциально неблагоприятные участки, на которых необходимо было установить наблюдения или принять превентивные меры. Карты масштаба 1:10000 были составлены на 400 км на Восточном участке БАМ (Тында – Зейск) и на 22 км – на Западном (Улан-Магит – Кодар). Детальные карты масштаба 1:1000 – 2000 были составлены на 23 «больных» места Восточного участка общей протяженностью 45 км и на 1 место Западного участка.

Для оценки возможных изменений инженерно-геокриологических условий, необходимости и достаточности проектируемых противодеформационных мероприятий выполнялось инженерно-геокриологическое прогнозирование, основанное на теплофизических расчетах и полученных при обследовании и картировании закономерностях формирования и развития инженерно-геокриологических условий конкретных участков земляного полотна. Всего было выполнено прогнозирование для 33 деформирующихся мест (28 – на Восточном и 5 – на Западном участках), причем для 24 мест прогнозирование было выполнено Мосгипротрансом собственными силами, а для 9 – с помощью субподрядных организаций (МГУ – 7 и ЦНИИС – 2). Теплофизические расчеты выполнялись для 10-15 вариантов изменения климатических факторов и противодеформационных мероприятий. При этом устанавливались наиболее вероятные причины возможных изменений мерзлотно-грунтовых условий, развития деформаций и давались рекомендации по наиболее оптимальным мероприятиям для устранения или предотвращения деформаций.

К сожалению, только первые два года работы по инженерно-геокриологическому обследованию и мониторингу земляного полотна БАМ выполнялись по описанной выше программе, рассчитанной на 5 лет и предусматривающей глубокие и последовательные исследования, как для обоснования и разработки противодеформационных мероприятий для известных «больных» мест, так и для выявления потенциально опасных участков и разработки превентивных мероприятий. В начале 1991 г. из-за финансовых трудностей БАМ ж.д. работы по инженерно-геокриологическому обследованию земляного полотна для общей характеристики и оценке состояния линии, выявления потенциально опасных участков были переориентированы на детальные изыскания для выпуска проектной документации по лечению наиболее деформирующихся участков. В 1992 г. работы по инженерно-геокриологическому обследованию и мониторингу земляного полотна БАМ практически прекратились.

Опыт организации и результаты инженерно-геокриологического обследования и мониторинга земляного полотна БАМ в 1989-1991 гг. был опубликован [2] и широко использовался в Китае на Цинхай-Тибетской ж.д. [3].

В настоящее время БАМ эксплуатируется на пределе пропускной способности. С учетом реализуемых инвестиционных проектов остро стоит вопрос о повышении его пропускной и провозной способности. Предполагается, что к 2020 г. необходимо увеличить пропускную способность БАМ в 4,8-7,5 раз.



Рис. 1. Деформации пути на 1832 км Восточно-Сибирской ж.д., 8.10.2010 г.

Главная проблема: состояние пути (рис. 1). Наиболее характерный пример: участок Наледный – Хани, что на западной части БАМ, входящей в состав Восточно-Сибирской ж.д. Протяженностью участка составляет 217,89 км, из которых земляного полотна – 211,5 км. По данным на 3.08.2010 г. на участке имелось 171 место с деформациями земляного полотна общей протяженностью 54,61 км (25,8% от длины участка) [5].

Аналогичная ситуация и на Дальневосточной дороге, где из 3539 км земляного полотна 637 км (18%) подвержены деформациям вследствие оттаивания многолетней мерзлоты в основании. Деформации железнодорожного пути носят многолетний и незатухающий характер как на участках, построенных в 1974-1988 гг., так и в 1932-1940 гг. Скорость движения поездов составляет в основном 60 км/час и только на отдельных участках 70 км/час; на «больших» же местах – 25-40 км/час. Надзор за состоянием земляного полотна в основном базируется на визуальных осмотрах работниками дистанций пути и на наблюдениях за температурой грунтов сотрудниками Тындинской мерзлотной станции, причем температурные наблюдения проводятся только на 41 участке из 1759 участков с деформациями земляного полотна.

Таким образом, для реализации стратегических задач по освоению прогнозируемого грузопотока по БАМ в 59,3-92,8 млн.тонн надо прежде всего обеспечить устойчивость и надежность пути на участках развития многолетнемерзлых грунтов, что возможно лишь при своевременном выявлении закономерностей развития мерзлотных условий на трассе, систематическом контроле их динамики и криогенного воздействия на элементы дороги, осуществлении защитных, преимущественно превентивных, мероприятий. Наиболее эффективно это возможно в рамках системы инженерно-геокриологического мониторинга железнодорожного пути БАМ, призванной обеспечить систематичность контроля, оценки, прогноза и управления развитием инженерно-геокриологических процессов на трассе пути для обеспечения стабильности земляного полотна и искусственных сооружений [4].

Литература

1. Бушин А.В. О задачах по обеспечению надежности земляного полотна железных дорог в современных условиях // Ж.д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство». 1992. Вып. 5-6. С. 1-14.
2. Кондратьев В.Г. Опыт организации инженерно-геокриологического обследования и мониторинга земляного полотна БАМ ж.д. // Ж.д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство». 1992. Вып. 5-6.
3. Кондратьев В.Г. Цинхай-Тибетская железная дорога – грандиозная попытка решить проблему обеспечения стабильности земляного полотна на вечной мерзлоте // Геотехника. 2011. № 1. С. 4-11.
4. Кондратьев В.Г. К вопросу об инженерно-геокриологическом мониторинге Байкало-Амурской Магистральной // Сб. тр. IV Междунар. геотехнического симп. «Превентивные геотехнические меры по уменьшению природных и техногенных бедствий». Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. С. 327-335.
5. Кондратьев В.Г., Валиев Н.А. Воздействие криогенных процессов и явлений на земляное полотно БАМ на участке Наледный – Хани и возможные пути его защиты // Тр. Седьмой науч.-техн. конф. с междунар. участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог». Чтения, посвященные 106-летию профессора Г.М. Шахуняца. М.: МИИТ, 2010. С. 114-117.
6. Кондратьев В.Г., Королев А.А. Состояние и задачи геокриологического обеспечения строительства // Транспортное строительство. 1988. № 6.
7. Кондратьев В.Г., Позин В.А. Концепция системы инженерно-геокриологического мониторинга строящегося железнодорожного пути Беркакит – Томмот – Якутск. Чита: Забтранс, 2000. 84 с.
8. Яковлев В.Е. Текущее содержание и капитальный ремонт земляного полотна в условиях БАМ ж.д. // Ж.д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство». 1992. Вып. 5-6.

Распределение плотности температурного коэффициента интенсивности мюонов в атмосфере и высотный ход температуры

В.С. Кузьменко, В.Л. Янчуковский, Е.Н. Анцыз

Геофизическая служба СО РАН

Известно [2], что наблюдаемые вариации интенсивности мюонов космических лучей (КЛ) в атмосфере являются суперпозицией эффектов различной природы. Они обусловлены изменениями условий, как в межпланетном пространстве, так и в атмосфере Земли (давление, температура, перераспределение масс). Вариации интенсивности мюонов, регистрируемых на уровне h_0 атмосферы в пункте с порогом геомагнитного обрезания R_c обычно [2] представляют в виде выражения

$$\frac{\Delta J_m}{J_m}(h_0) = \left\{ \exp \left[- \int_{h_0}^h \beta_m(h) dh \right] - 1 \right\} + \int_0^h w_i(T_0, h_0, h) \Delta T(h) dh + \int_{R_c}^{\infty} \frac{\Delta D}{D}(R) W(R, h_0) dR, \quad (1)$$

где $\beta_m(h)$ - барометрический коэффициент интенсивности мюонов, $w_i(T_0, h_0, h)$ - функция плотности температурных коэффициентов, отражающая вклад слоев атмосферы в создании интегрального температурного эффекта интенсивности; $\Delta T(h)$ - временные вариации температуры атмосферы в зависимости от высоты, $\frac{\Delta D}{D}(R)$ и $W(R, h_0)$ - спектр вариаций первичного потока и коэффициенты связи для мюонной компоненты КЛ соответственно. При этом предполагается, что барометрические коэффициенты и плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов КЛ известны. Теоретически рассчитанные значения плотности температурных коэффициентов были получены ранее [3,4] для наземных мюонных телескопов с экранами, имеющими порог $\Delta \varepsilon \leq 0,4$ ГэВ, и для подземных мюонных телескопов с $\Delta \varepsilon \geq 1,6$ ГэВ. Совершенно очевидно, что для корректного учета метеорологических эффектов интенсивности мюонов следует использовать значения этих параметров, найденные экспериментально.

Оценка метеорологических коэффициентов интенсивности мюонов

Вариации интенсивности мюонов КЛ (1) в то же время можно представить в рамках линейного приближения в виде многофакторного уравнения регрессии, в котором барометрический, температурный эффект и эффект от первичной вариации КЛ выражены через факторы x_1, x_2, x_3, x_4 :

$$Y = A_0 + \sum_{j=1}^4 A_j \cdot X_j + \varepsilon \quad (2)$$

Результативный фактор y - вариации интенсивности мюонов $\frac{J_{mi} - \bar{J}_m}{\bar{J}_m} \cdot 100 = \delta J_{mi}$, фактор x_1 - изменения атмосферного давления $h_i - h_0 = \Delta h_i$, фактор x_2 - изменения температуры слоя переменной массы (приземного слоя) $(T_{ni} - \bar{T}_n) \cdot (P_i - 950) = \Delta t_i (P_i - 950)$, фактор x_3 - изменения среднemasсовой температуры атмосферы $T_{cmi} - \bar{T}_{cm} = \Delta T_{cmi}$, фактор x_4 - изменения интенсивности нейтронной компоненты, обусловленные изменениями спектра первичного потока КЛ, $\frac{N_i - \bar{N}}{\bar{N}} \cdot 100 = \delta n_i$.

Уравнение (2) было представлено в стандартизованном масштабе, в котором $y_i^{\wedge} = (y_i - \bar{Y}) / \sigma_Y$; $x_{ji}^{\wedge} = (x_{ji} - \bar{X}_j) / \sigma_{X_j}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m(4)}$ - стандартизованные переменные, а стандартизованные коэффициенты регрессии α_j находились из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} r_{YX_1} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot r_{X_1 X_2} + \alpha_3 \cdot r_{X_1 X_3} + \alpha_4 \cdot r_{X_1 X_4}, \\ r_{YX_2} = \alpha_1 \cdot r_{X_2 X_1} + \alpha_2 + \alpha_3 \cdot r_{X_2 X_3} + \alpha_4 \cdot r_{X_2 X_4}, \\ r_{YX_3} = \alpha_1 \cdot r_{X_3 X_1} + \alpha_2 \cdot r_{X_3 X_2} + \alpha_3 + \alpha_4 \cdot r_{X_3 X_4}, \\ r_{YX_4} = \alpha_1 \cdot r_{X_4 X_1} + \alpha_2 \cdot r_{X_4 X_2} + \alpha_3 \cdot r_{X_4 X_3} + \alpha_4. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $r_{YX_j}, r_{X_j X_k}$ - коэффициенты парной линейной корреляции между переменными.

Переход от найденных стандартизованных коэффициентов α_j к искомым коэффициентам многофакторной регрессии A_j осуществлялся с помощью соотношения:

$$A_j = \alpha_j \sigma_y / \sigma_{x_j} . \quad (4)$$

Метеорологические коэффициенты интенсивности мюонов (барометрический A_1 , температурный для приземного слоя A_2 , температурный для среднемассовой температуры атмосферы A_3), полученные таким образом экспериментально, представлены таблицей для общей ионизирующей компоненты (G.I.) и мюонов под различными углами к зениту. При этом использовались результаты аэрологического зондирования и данные непрерывных наблюдений мюонной компоненты КЛ в Новосибирске за период 2004-2010 гг.

A_j	G.I.	0	30	40	50	60	67	71
A_1 , %/мб	-0.175	-0.143	-0.139	-0.142	-0.149	-0.169	-0.233	-0.430
A_2 , %/°C, 10^{-2}	-0.033	-0.042	-0.047	-0.047	-0.049	-0.050	-0.061	-0.045
A_3 , %/°C	-0.222	-0.328	-0.313	-0.317	-0.384	-0.308	-0.324	-0.355
A_4	0.375	0.482	0.429	0.397	0.433	0.220	0.267	0.393

Таблица. Метеорологические коэффициенты интенсивности мюонов.

Оценка плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов

Было показано [5], что интегральный (от всей атмосферы) температурный эффект интенсивности мюонов может быть представлен как эффект от средневзвешенной по массе температуры атмосферы

$$\Delta T_{cm} = \sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta h_i / \sum_{i=1}^n \Delta h_i . \quad (5)$$

Здесь ΔT_i и Δh_i - изменения температуры и масса слоя i атмосферы соответственно. Знание температурного коэффициента интенсивности мюонов от среднемассовой температуры атмосферы A_3 позволяет оценить температурный эффект интенсивности мюонов от всей атмосферы (интегральный): $[(J_i - \bar{J})/\bar{J}] \cdot 100 = A_{cm} \Delta T_{cm}$. Для оценки температурных коэффициентов интенсивности на k изобарах можно также использовать многофакторное уравнение регрессии вида (2) для k факторов, в котором результирующий фактор y - вариации интенсивности $A_{cm} \cdot \Delta T_{cm}$, фактор x_j - изменения температуры на изобаре j $T_{ji} - \bar{T}_j = \Delta T_{ji}$.

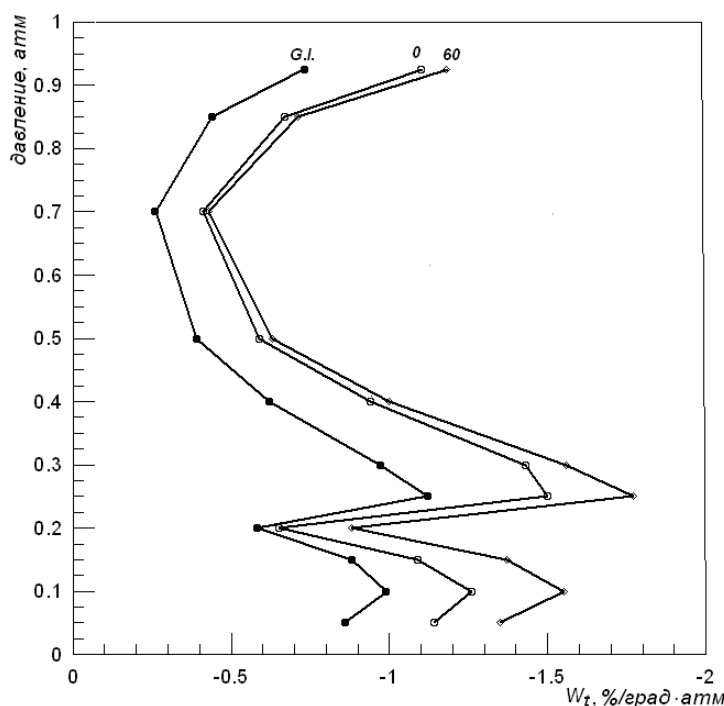


Рис. 1. Распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере.

Однако ввиду условности разделения атмосферы на отдельные слои очевидна сильная корреляция (не только парная) между значениями температуры на каждом слое, что подтверждают диаграммы рассеяния и расчетные значения коэффициентов парной корреляции. Таким образом, прямое разрешение регрессии

не представляется возможным, а методы, такие как гребневая регрессия, дают искусственно зашумленный результат, что является необходимым условием для получения устойчивого решения. В этой связи был использован метод главных компонент [1]. Процедура выделения главных компонент подобна вращению, максимизирующему дисперсию исходного пространства переменных. Метод позволяет получить ортогональные проекции исходных температур на подпространство главных компонент. Таким образом становится возможным прямое разрешение регрессии. Полученные в подпространстве главных компонент, температурные коэффициенты с помощью матрицы перехода переводятся в исходное пространство. На рис. 1 представлены найденные значения плотности температурных коэффициентов интенсивности w_i для общей ионизирующей компоненты и мюонной компоненты под различными углами к зениту в атмосфере.

Полученные результаты с одной стороны позволяют находить температурную составляющую вариаций интенсивности мюонов, а с другой получать информацию о температурном режиме атмосферы.

Мониторинг температурного режима атмосферы с помощью космических лучей

Температурная составляющая вариаций интенсивности космических лучей в выражении (1) оценивается по результатам спектрографического анализа вариаций КЛ [4]. Исходя из выделенной температурной составляющей вариаций интенсивности мюонов под различными углами к зениту и используя полученные распределения плотности температурных коэффициентов, сделана оценка изменений температуры различных слоев атмосферы за указанный период (когда число слоев не превышает число каналов регистрации мюонов).

$$\delta I_T(h_0, \theta, t) = \alpha_T(\theta) \Delta T_{cm}(t) = \sum_{i=1}^N k_i(\theta) \Delta T_i(t). \quad (6)$$

Здесь $k_i(\theta) = w_T(h, \theta) \cdot \Delta h_i$, а $w_T(h, \theta)$ - функция плотности температурного коэффициента. Изменения температуры $\Delta T_i(t)$ также находились как

$$\Delta T_i(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta I_{T,k}(\theta, t) / R_k(\theta), \quad (7)$$

где $\delta I_{T,k}(\theta)$ - температурная составляющая вариации интенсивности мюонов под различными углами к зениту, $R_k(\theta)$ - коэффициенты регрессии для пар значений $\delta I_{T,k}(\theta)$ и ΔT_i слоя i атмосферы, n - число каналов регистрации мюонов под зенитными углами θ .

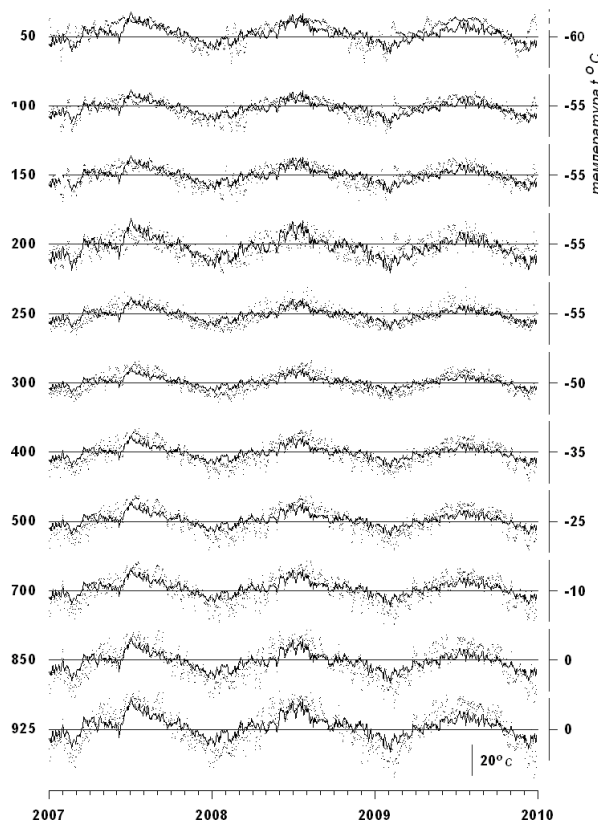


Рис. 2. Вариации температуры атмосферы на различных изобарических уровнях за период 2007-2010 гг.

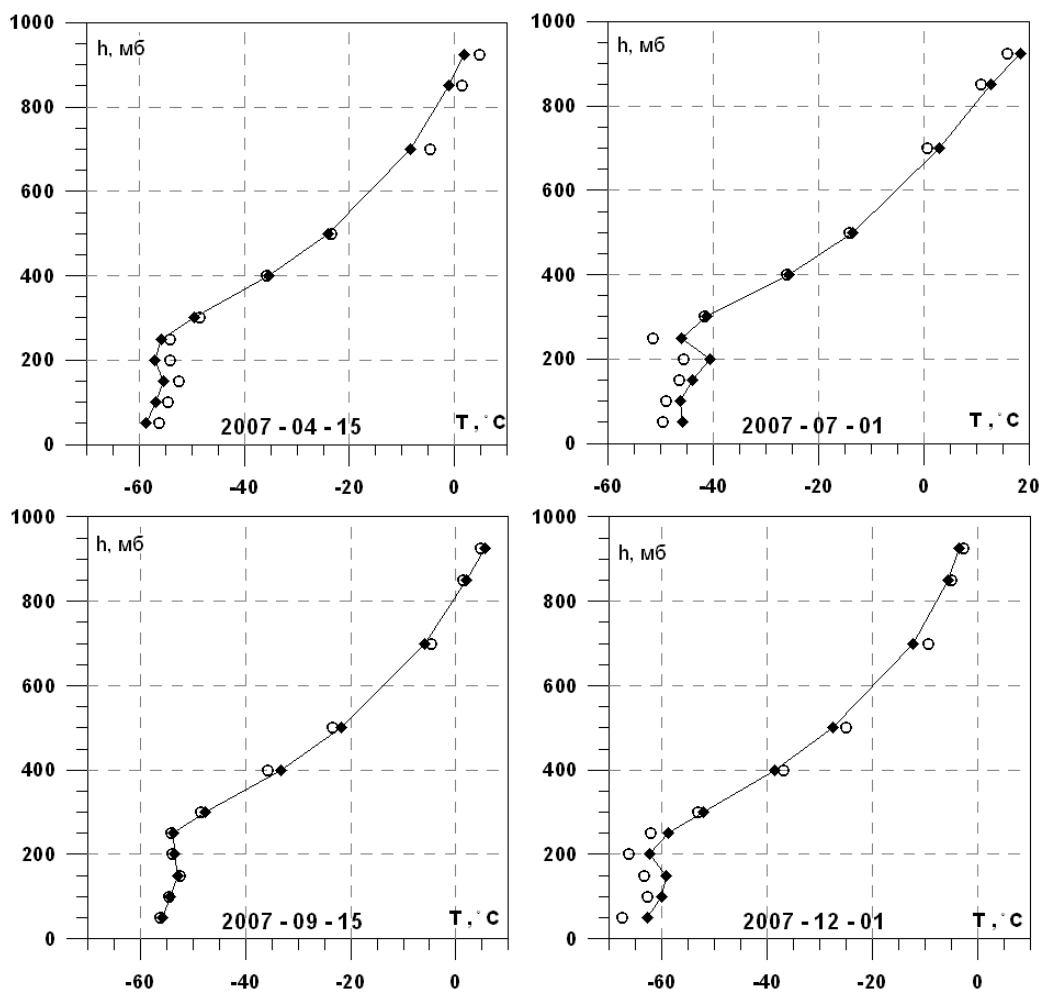


Рис. 3. Высотные профили температуры атмосферы, полученные по данным наблюдений космических лучей (квадратики) и по данным аэрологического зондирования (кружки).

Полученные результаты представлены на рис. 2 (сплошными линиями показаны вариации температуры, найденной по результатам непрерывной регистрации КЛ, точками приведены данные аэрологического зондирования). На рис. 3 приведены высотные профили температуры атмосферы для различных сезонов года.

Заключение

Покомпонентная многоканальная непрерывная регистрация космических лучей, с одной стороны, обеспечивают получение информации о вариациях потока первичного излучения в различных областях энергий, а с другой позволяет проводить мониторинг температурного режима атмосферы в реальном времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (проект №8.2 «Космические лучи в гелиосферных процессах по наземным и стратосферным наблюдениям» в рамках программы № 8 «Физика нейтрино и нейтринная астрофизика»).

Литература

1. Айвазян С.А., Бежаева З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1974. 240 с.
2. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.
3. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 211 с.
4. Кузьмин А.И. Вариации космических лучей высоких энергий. М.: Наука, 1964. 159 с.
5. Янчуковский В.Л., Кузьменко В.С., Анцыз Е.Н. Солнечно-земная физика. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2010. Вып. 16. С. 110-112.

Изменение подстилающей поверхности в районе Юрубченского месторождения в результате антропогенной деятельности

С.В. Михайлюта¹, О.В. Тасейко¹, А.А. Леженин², Н.В. Трофимова³

¹ СибГАУ, НП «Центр Прикладной Геоэкологии», Красноярск

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

³ ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск

Введение

Анализ состояния окружающей среды в районах деятельности объектов нефтегазового комплекса показывает, что воздействие нефтедобычи на природную среду проявляется в основном в механическом воздействии на подстилающую поверхность и химическом загрязнении объектов окружающей природной среды. Нарушения подстилающей поверхности в районах добычи нефти связаны со строительством автодорог, поселков и коммуникаций, с обустройством нефтяных месторождений (возведение буровых установок, прокладка трубопроводов), с проведением линий электропередач, перемещением тягачей и другой тяжелой транспортной техники [1,2].

Нефтегазовые месторождения Красноярского края расположены в условиях уязвимых природных экосистем севера. Проявлением механического воздействия в этом случае является не только нарушение почвенно-растительного покрова, обладающего высокой чувствительностью к антропогенным факторам, и изменение гидрологического режима, выражающегося через изменение поверхностного стока влаги, но и в изменении климатических характеристик в районе нефтегазодобычи, что более важно в глобальном экосистемном смысле. Изменение климатических характеристик происходит в результате изменения альbedo подстилающей поверхности на всех нарушенных площадях.

Альbedo – доля отраженного Землей солнечного излучения – характеризуется большой изменчивостью – от нескольких процентов для водных поверхностей при больших высотах солнца, до 100% в полярных районах [3]. Глобальное альbedo играет важную климатообразующую роль, так как эта величина определяет приходную часть радиационного баланса Земли. Альbedo – величина аддитивная и изменение его на отдельных участках может иметь региональные и даже глобальные последствия.

В данной работе рассмотрено изменение альbedo подстилающей поверхности, вегетационного индекса и индекса влажности в результате хозяйственной деятельности в районе Юрубченского месторождения севера Красноярского края.

1. Объект исследования

Объектом исследования являются изменения подстилающей поверхности, происходящие на территории Юрубченского месторождения.

1.1. Характеристика хозяйственной деятельности Юрубченского месторождения. Объединенный Красноярский край обладает обширными геологическими запасами углеводородного сырья: нефти около 3 млрд.т, газа природного около 1200 млрд. м³, газа растворенного около 150 млрд. м³ и конденсата – более 100 млн. т. К настоящему моменту геологических запасов из недр извлекается около 30% нефти и 60% конденсата. Крупнейшим по запасам и наиболее изученным является Юрубчено-Тохомское нефтегазоконденсатное месторождение.

Юрубченское месторождение занимает площадь около 6 тыс. км², количество скважин на территории месторождения к 2010 г. составляет менее 50, а к 2017 году прогнозируется их увеличение до 300 [4].

Геологическое изучение и добыча углеводородов на территории месторождения начата с 1996 г., при этом первые 5 лет продолжался этап геологического изучения.

В связи с удаленностью месторождения от действующего магистрального нефтепровода (более 700 км) и железной дороги (более 350 км) не ведется полномасштабная добыча нефти, а осуществляется лишь пробная эксплуатация отдельных скважин. Так как на территории округа наземные транспортные пути круглогодичного действия отсутствуют, пробная эксплуатация скважин проводится только в период действия зимних дорог. Нефть вывозится автотранспортом и используется для местных и собственных нужд в качестве котельно-печного топлива, а также для технологических целей при строительстве скважин [5].

К числу объектов, оказывающих непосредственное воздействие на окружающую среду участка Юрубченского месторождения относятся трассы сейсмопрофилей, линии электропередач, автодороги, нефтепроводы и газопроводы, площадки буровых скважин, вахтовый поселок, карьеры по добыче песчаного материала. Уменьшение лесопроизводящих площадей, сокращение общего запаса насаждений, повышение пожарной опасности происходит также и в результате вырубок леса.

1.2. Растительный покров территории Юрубченского месторождения. Территория Юрубченского месторождения относится к Приенисейской провинции Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной области. Существенным фактором почвообразования на территории является наличие многолетней

(вечной) мерзлоты. Мощность мерзлых пород ориентировочно составляет 13-30 метров при глубине сезонного протаивания (промерзания) от 1,5 до 3 метров [5]

Территория месторождения расположена в зоне среднесибирской тайги. Леса лиственные, лиственно-сосновые с примесью березы, ели, пихты и кедра. Значительную часть площади, расширяющуюся из года в год в результате лесных пожаров, занимают березовые, березово-осиновые леса на участках гарей.

2. Цели и задачи

В данной работе на примере Юрубченского месторождения рассмотрены изменения характеристик подстилающей поверхности (альbedo подстилающей поверхности, влажностный режим, вегетационный индекс) в результате антропогенного воздействия.

Альbedo подстилающей поверхности исследовалось с помощью снимков со спектрорадиометра MODIS спутника TERRA. Выделены и рассмотрены характерные ситуации до наступления вегетационного периода – 13 апреля 2009 г. и в завершении периода вегетации – 27 августа 2009 г.

Вегетационный индекс (NDVI) и индекс влажности земной поверхности (LSWI) оценивались с помощью модели GLO-PEM [6,7], которая учитывает комбинацию данных с различных спектральных каналов спутника (температура, влажность, вегетационный индекс, количество солнечной радиации и др.). Для анализа динамики индексов NDVI и LSWI использовались данные за период с 2000 по 2006 г. со спектрорадиометра MODIS спутника TERRA.

3. Методы

3.1. Анализ теплофизических свойств подстилающей поверхности. В работе использованы снимки со спектрорадиометра MODIS спутника TERRA. Для сравнения результатов дешифрирования были выбраны 2 фоновых участка. Фоновый участок, площадью около 10000 км² расположен в 35 км на северо-восток от территории месторождения. Локализация тестового (территория Юрубченского месторождения) и фоновых участков исследования представлена на рис. 1.

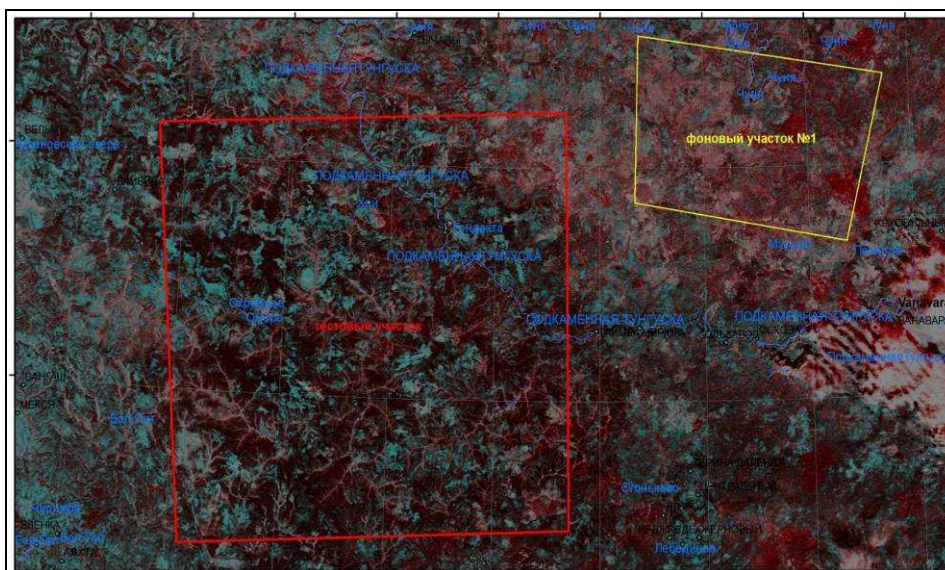


Рис. 1. Расположение тестового и фоновых объектов исследования.

Подложка снимок TERRA-MODIS 27 августа 2009 г., пространственное разрешение 250 м.

Для анализа выбрано 2 характерных сцены: до наступления вегетационного периода 13 апреля 2009 г. и в завершении периода вегетации 27 августа 2009 г. Для расчета альbedo использовались 1 и 2 каналы спектрорадиометра MODIS с пространственным разрешением 250 метров.

Обработка изображений производилась в программном пакете Sectorizer (разработка ВНИИ ГО ЧС г. Красноярск). Для расчета значений альbedo подстилающей поверхности был произведен пересчет калибровок спектральной яркости пикселей 1 и 2 каналов изображения [8-11].

3.2. Анализ растительного покрова. Для описания состояния растительного покрова использовались следующие параметры: вегетационный индекс (NDVI) и индекс влажности земной поверхности (LSWI). Для этого обрабатывались данные со спектрорадиометра MODIS спутника TERRA за период с 2000 по 2006 г.

Выбранные для исследования параметры связаны как с качеством (видовой состав, физиологическое состояние) так и с количеством наземной растительности. По каждому параметру рассматривалась функция распределения полученного по территории месторождения набора частот значений и сравнивалась с такой же функцией рассчитанной для фоновой участка. Фоновый участок был выбран на северо-востоке от месторождения, где по данным наземных наблюдений находится ближайшая

территория с такой же лесной экосистемой, подобным рельефом и без интенсивного антропогенного воздействия.

Функция распределения строилась по 15 классам, для рассмотренных индексов шкала значений рассчитывалась на диапазоне от 0 до 1.

Проанализированы среднемесячные данные каждого параметра за вегетационный период и по среднегодовым значениям индексов построены тренды значений.

Для сравнения функций распределения использовался F-тест Фишера, позволяющий оценить отличия дисперсий полученных кривых.

4. Результаты и обсуждение

4.1. Изменение альbedo подстилающей поверхности. В результате обработки космоснимков было получено картографическое отображение распределения значений альbedo подстилающей поверхности для тестового и фонового участков до начала вегетационного периода (13 апреля 2009 г.) (рис. 2,а) и в последней фазе вегетационного периода (27 августа 2009 г.) (ри. 2,а).

Численные значения альbedo с шагом 250 метров были получены для тестового и фонового участков и проанализированы статистическими методами. Можно видеть (рис. 3), что различия значений альbedo на тестовом и фоновом участках значимы только в апреле до наступления вегетационного периода. В конце вегетационного периода все различия сглаживаются, и функции плотности тестового и фонового участков имеют одинаковый вид. Статистические параметры распределений альbedo за апрель и август 2009 г. приведены в таблице.

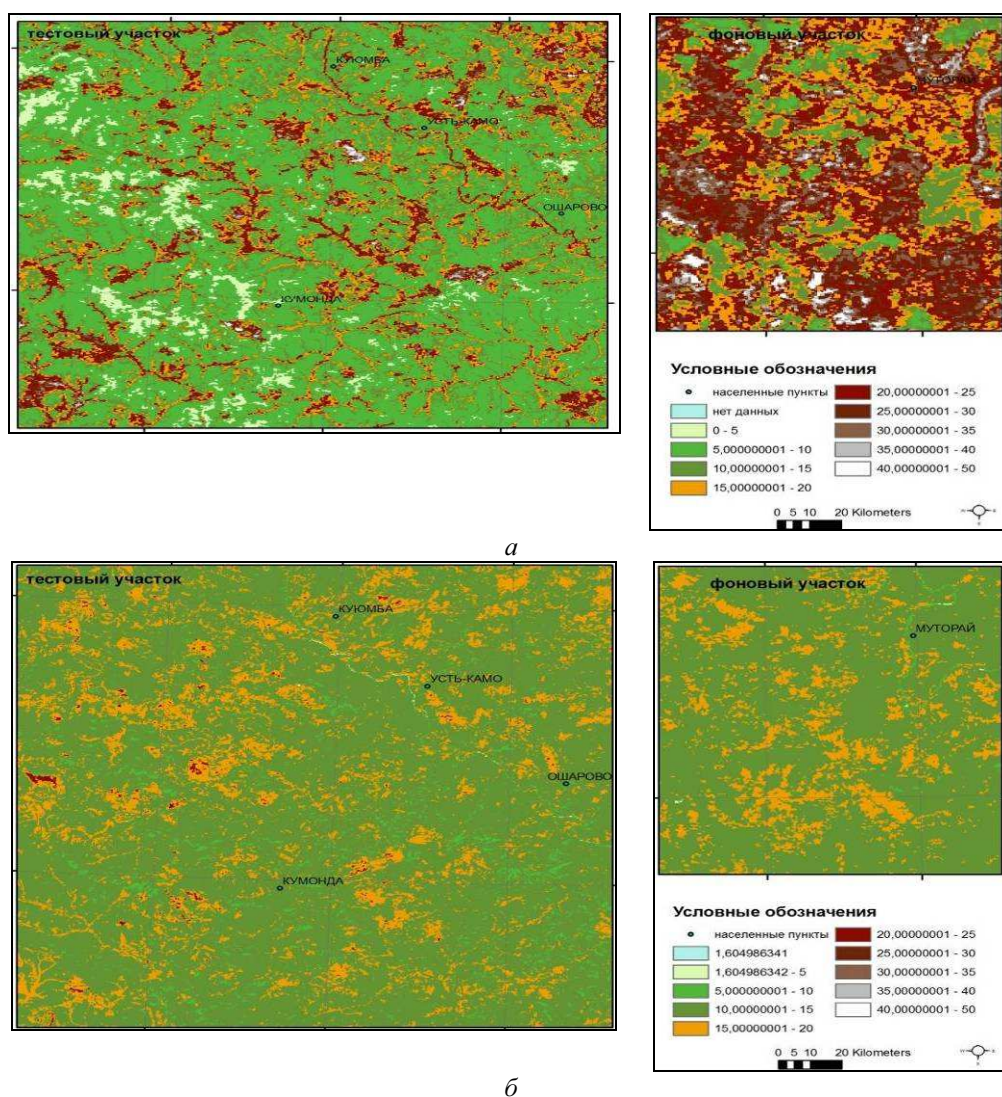


Рис. 2. Картографическое отображение полей альbedo подстилающей поверхности для тестового и фонового участков по данным MODIS за 13.04.2009 г. (а) и 27.08.2009 г. (б).

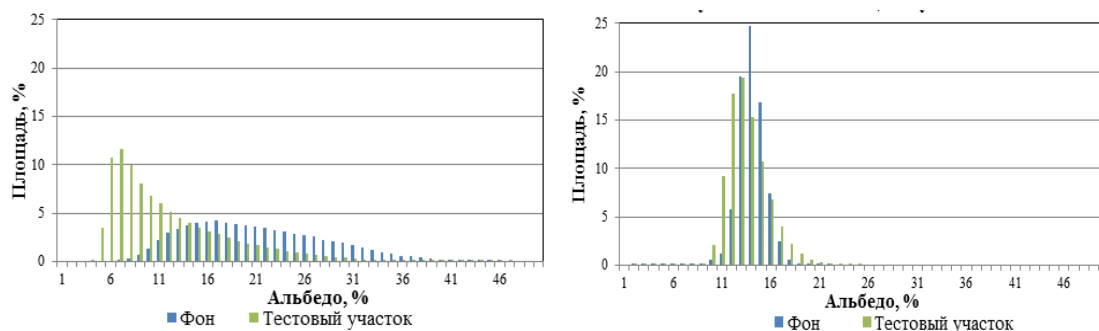


Рис. 3. Функции плотности значений альbedo для фонового и тестового участков за апрель (слева) и август 2009 г. (справа).

Таблица. Статистические характеристики значений альbedo.

Статистические показатели	Апрель 2009		Август 2009	
	Фоновый участок	Тестовый участок	Фоновый участок	Тестовый участок
Среднее	20.7	11.6	13.5	13.1
Дисперсия	51.6	38.0	1.9	4.2
Среднеквадратичное отклонение	7.2	6.2	1.4	2.0
Максимальное значение	45.0	46.5	21.1	24.7
Минимальное значение	6.0	3.9	1.9	1.6

В августе различия между тестовым и фоновым участками не проявляется. Это связано с интенсивным развитием растительного покрова в этот период. Для периода наибольших различий альbedo тестового и фонового участков (апрель) среднее значение показателя отличается в 2 раза. Такое низкое значение альbedo на тестовом участке свидетельствует об антропогенной нарушенности территории. На фоновом участке в это время еще сохраняется снежный покров, поскольку растительность более густая, а на тестовом в результате вырубki деревьев и развития объектов инфраструктуры, снежный покров сходit раньше.

Определение альbedo имеет исключительно большое значение для расчета радиационного баланса подстилающей поверхности, который, в свою очередь, определяет температурный режим подстилающей поверхности и атмосферы в целом [3]. Температура земной поверхности очень чувствительна к вариациям альbedo. Известно, что изменение альbedo только на 10% дает разницу в приземной температуре более двух градусов [12]. Таким образом, изменения, происходящие на территории нефтегазовых месторождений Красноярского края могут иметь последствия, связанные со значительным влиянием на региональный климат.

4.2. Изменение растительного покрова. По показателям состояния растительного покрова (LSWI (рис. 4) и NDVI (рис. 5)) проанализированы среднемесячные данные за вегетационный период. По среднегодовым значениям индексов построены тренды значений, которые сравнивались для территории месторождения и фонового участка. Можно сделать вывод о различном характере кривых распределения вегетационного индекса и индекса влажности для рассмотренных спутниковых данных, поскольку каждый параметр описывает специфические свойства наземной лесной экосистемы.

С помощью статистических методов анализа получено, что распределения значений индексов (NDVI и LSWI) различаются между собой дисперсиями, в то время как средние значения для тестовой территории и территории эксплуатируемого месторождения достаточно близки для большей части вегетационного периода. Значимые различия между дисперсиями кривых для территории месторождения и тестовой территории получены в весенние месяцы для всех рассмотренных параметров, что отражает общие тенденции в состоянии лесного покрова. Наибольшие отличия показателей для фонового и тестового участков наблюдаются в мае. По некоторым годам для индекса влажности и вегетационного индекса получены значимые отличия также и в осенние месяцы.

Общей тенденцией является увеличение дисперсии на территории месторождения по сравнению с фоновым участком. Это объясняется присутствием на территории большего разнообразия факторов, воздействующих на растительность, когда к природным факторам добавляются еще и антропогенные. К этим факторам относится развитие объектов инфраструктуры (буровых площадок, геофизических профилей и тракторных дорог), задымленность атмосферного воздуха, приводящая к большему загрязнению снежного покрова на территории месторождения, нефтяные разливы, загрязняющую почву и поверхностные воды и др. Состояние растительности отражает вегетационный индекс NDVI, являясь наиболее динамичным из рассмотренных космических данных. Значения вегетационного индекса очень зависимы от погодных условий, различных в зависимости от сезона и года.

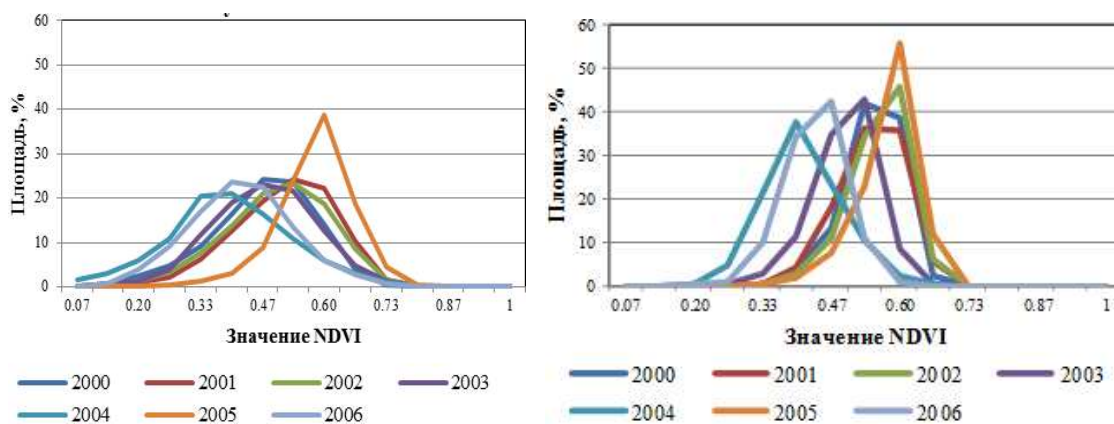


Рис. 4. Функции плотности (15 классов) значений NDVI для тестового (слева) и фонового (справа) участков территории Юрубченского месторождения за период 2000-2006 гг.

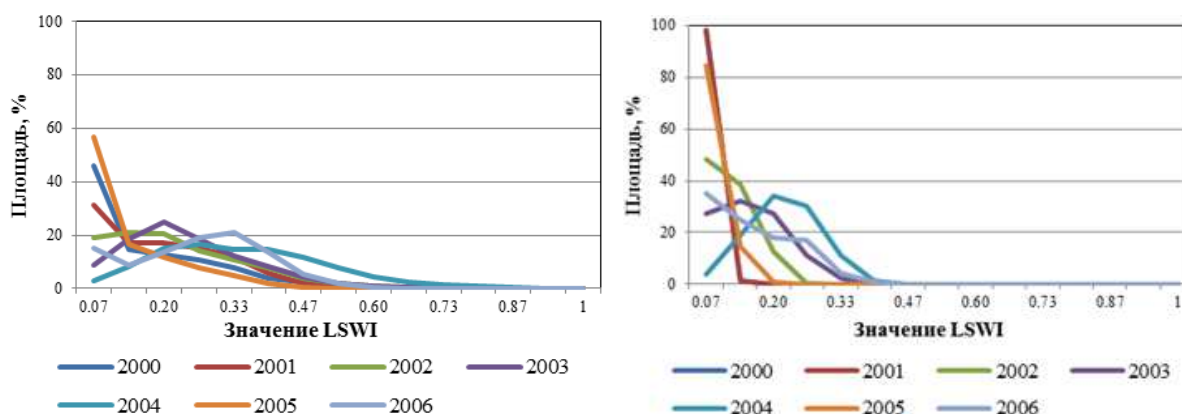


Рис. 5. Функции плотности (15 классов) значений LSWI для тестового (слева) и фонового (справа) участков территории Юрубченского месторождения за период 2000-2006 гг.

По среднегодовым трендам выявлено увеличение количества пикселей с небольшими значениями NDVI, однако, связано это с деградацией растительности или с климатическими условиями остается вопросом, требующим дополнительного изучения.

Анализ функций плотности для индекса влажности показал большую увлажненность территории месторождения в весенние месяцы по сравнению с тестовым участком. Значение индекса влажности для территории месторождения в 2 раза выше, чем для фонового участка в 2002 г., а в отдельные годы (2000 и 2001) различие индексов влажности в весенние месяцы достигает 3 раз. Это связано, в первую очередь, с различной динамикой снежного покрова на территории месторождения и на фоновом участке. Во-первых, на территории месторождения снежный покров загрязнен в результате антропогенной деятельности, что приводит к более раннему началу таяния снега. Во-вторых, нарушение растительного покрова, связанное с вырубкой леса для строительства объектов инфраструктуры и распространением гарей как природного, так и антропогенного происхождения. Нарушение растительного покрова не позволяет в зимний период задерживаться достаточному количеству снега на территории месторождения, а в весенний не препятствует его таянию, как это происходит на фоновом участке. Все это приводит также более раннему началу вегетации. Этим фактом, скорее всего, объясняются различия в дисперсиях для вегетационного индекса (см. рис. 4).

Полученные тренды среднемесячных значений NDVI и LSWI индексов показали, что экосистемы на обеих территориях практически идентичны, однако, значения вегетационного индекса на территории месторождения ниже и эта территория более увлажнена. Эти факты являются следствием антропогенного воздействия, что проявляется в появлении фрагментированности растительности, преждевременном усыхании листовых пластинок и других изменений в лесной экосистеме вследствие адаптации.

5. Заключение

В результате проведенного исследования выявлено значительное изменение всех показателей (альbedo, NDVI, LSWI) в результате антропогенной деятельности на территории Юрубченского месторождения по сравнению с фоновым участком. Эти отличия максимальны в весенний период (составляют 100% по сравнению с фоновым участком) и минимальны в конце вегетационного периода.

Развитие объектов нефтегазовой отрасли в северных районах Красноярского края приводит к понижению альbedo подстилающей поверхности, повышению влажности территории.

При оптимизации системы мониторинга окружающей природной среды в районах нефтегазовых месторождений необходимо учитывать особенности изменения альbedo подстилающей поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке ККФН-РФФИ (грант № 09-05-98023-р_сибирь_а).

Литература

1. Гриценко А.И., Акопова Г.С., Максимов В.М. Экология. Нефть и Газ. М.: Наука, 1997. 598 с.
2. Мазур И.И. Экология нефтегазового комплекса. Наука. Техника. Экономика. М.: Недра, 1993. 493 с.
3. Кондратьев К.Я. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 231 с.
4. Бурмин В.И. Мониторинг геологической среды в районе Юрубченского месторождения углеводородов. Т.1. Красноярск, 2001. 66 с.
5. Васильев В.Г. и др. Мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края. (Краткий вариант отчета, включая основные положения и результаты опытного внедрения мониторинга в 2008 г.). Красноярск: СФУ, 2009. 100 с.
6. Xiangming X., Hollinger D., Aber J. et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest // Remote Sensing of Environment. 2004. Vol. 89. P. 519-534.
7. Goetz S., Prince S., Goward S. et al. Satellite remote sensing of primary production: an improved production efficiency modeling approach // Ecological Modelling. 1999. Vol. 122. P. 239-255.
8. Wanner W., Strahler A.H., Hu B. et al. Global retrieval of bidirectional reectance and albedo over land from EOS MODIS and MISR data: theory and algorithm // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102. P. 17143-17162.
9. Dorman J.L., Sellers P.J. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the Simple Biosphere Model (SiB) // J. Appl. Meteorol. 1989. Vol. 28. P. 833-855.
10. Smith W.L., Woolf H.M., Schriener A.J. Simultaneous retrieval of surface and atmospheric parameters: a physical and analytically direct approach, in Advances / A. Deepak, H.E. Fleming, M.T. Chahine (Ed.) // Remote Sensing Retrieval Methods. USA: A. Deepak Publishing, 1985. P. 221-232.
11. Vidal A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data // Int. J. Remote Sens. 1991. Vol. 12, N 12. P. 2449-2460.
12. Неелова Л.О. Параметризация альbedo подстилающей поверхности в гидродинамических моделях атмосферной циркуляции // МКО. 2007. Т. 2. С. 249-253.

Информационно-вычислительная система для анализа влияния загрязнения окружающей среды на биологические объекты

Ю.И. Молородов, В.С. Миньков

Институт вычислительных технологий СО РАН

Введение

Атмосферный воздух является наиболее важной жизнеобеспечивающей природной средой. Он представляет собой смесь газов и аэрозолей приземного слоя атмосферы, сложившуюся в ходе эволюции Земли, деятельности человека и находящуюся за пределами жилых, производственных и иных помещений. Результаты экологических исследований, как в России, так и за рубежом, однозначно свидетельствуют о том, что загрязнение приземной атмосферы – самый мощный, постоянно действующий фактор воздействия на человека, пищевую цепь и окружающую среду. Атмосферный воздух имеет неограниченную емкость и играет роль наиболее подвижного, химически агрессивного и всепроникающего агента взаимодействия вблизи поверхности компонентов биосферы, гидросферы и литосферы.

Атмосфера оказывает интенсивное воздействие не только на человека и биоту, но и на гидросферу, почвенно-растительный покров, геологическую среду, здания, сооружения и другие техногенные объекты. Поэтому охрана атмосферного воздуха и озонового слоя является наиболее приоритетной проблемой экологии и ей уделяется пристальное внимание во всех развитых странах.

В Западной Европе приоритет отдается 28 особо опасным химическим элементам, соединениям и их группам. В группу органических веществ входят акрил, нитрил, бензол, формальдегид, стирол, толуол, винилхлорид, а неорганических – тяжелые металлы (As, Cd, Cr, Pb, Mn, Hg, Ni, V), газы (угарный газ, сероводород, оксиды азота и серы, радон, озон), асбест. Преимущественно токсическое действие оказывают свинец, кадмий. Интенсивный неприятный запах имеют сероуглерод, сероводород, стирол, тетрахлоэтан, толуол. Ареал воздействия оксидов серы и азота распространяется на большие расстояния. Указанные загрязнители воздуха входят в международный реестр потенциально токсичных химических веществ.

Актуальность работы

Новосибирск является мегаполисом (с населением более 1.5 млн. человек), большим количеством автомобильного транспорта и массой других антропогенных источников. Атмосфера города подвержена сильному загрязнению, в том числе и влиянию атмосферными аэрозолями. Значения качественного и количественного содержания органических веществ в аэрозолях являются важным критерием для оценки загрязнения атмосферы и окружающей среды. Для этого на территории г. Новосибирска службами Гидрометеоцентра расположены посты наблюдения за состоянием атмосферы. На них производятся, в соответствии с рекомендациями ВОЗ, измерения в воздухе атмосферы содержания пыли, сажи, диоксида серы SO₂, озона, оксида углерода CO, диоксида азота NO₂, оксида азота NO, сероводорода H₂S, фенола СН, фтористого водорода HF, аммиака NH₃, формальдегида CH₂O и др. Измерения производятся регулярно в течение дня с интервалом в 6 часов.

Объемы данных, полученных на постах наблюдений значительны по объемам и разнообразию. Это обстоятельство делает необходимым и актуальным использование автоматизированных информационно-вычислительных систем для задач, связанных с наблюдением за состоянием атмосферы. Использование электронных версий позволит рядовому пользователю облегчить рутинную доставку результатов наблюдений, хранение и математическую обработку.

В этой связи была разработана специализированная проблемно-ориентированная Информационная Система, которая позволяет решить проблему хранения этого эмпирического материала, его обработку с помощью современных математических алгоритмов. Это позволит перевести работу с этими данными на качественно более высокий уровень, открывающий перспективы для постановки и эффективного решения новых научных и практических задач.

В работе использовались данные многолетних наблюдений полученные в ИХКиГ СО РАН.

1. Элементный состав крови коренных жителей Севера (тундровых ненцев, чукчей, эскимосов), мелких млекопитающих, почвы и воды, атмосферных аэрозолей, собранных на территориях Ямало-Ненецкого (г. Тарко-Сале, п. Красноселькуп, с. Самбург), Чукотского (п. Канчалан) автономных округов, республики Саха (Усть — Алдынский улус) и территорий бухты Провидения (п. Новое Чаплино) за период 2001-2003 гг.;
2. Элементные составы плаценты жителей г. Новосибирска, атмосферных аэрозолей, собранных на территориях Железнодорожного и Ленинского районов г. Новосибирска и п. Ключи за период 2007-2008 гг.

Логическая модель данных

Многоэлементный состав биосубстратов и атмосферных аэрозолей АА описывается набором метаданных, включающих:

- 1) *Пункт наблюдений*, на котором производились измерения. Его основным свойством являются *координаты* поста наблюдений и его *тип*;
- 2) *Объект измерения* характеризующийся его названием. Например, разнообразные биосубстраты (кровь, волосы и пр.);
- 3) *Характеристика объекта измерений*, включающая название измерявшейся характеристики (концентрация химического элемента), и его размерность ($\text{нг}/\text{м}^3$);
- 4) *Инструмент (прибор)*, с помощью которого производились измерения. Его главной характеристикой является название;
- 5) *Метод предварительной обработки* данных (почасовое усреднение). Основной характеристикой этого свойства является название метода.
- 6) *Класс объекта измерений*. Так, если объектом измерений выступает мышечная ткань, то его классом будет видовая принадлежность организма (человек, медведь и т.п.).
- 7) *Дополнительные метаданные*, такие как половая принадлежность, возрастная группа источника биосубстратов.

Логическая структура данных, представлена в виде модели на рис. 1.

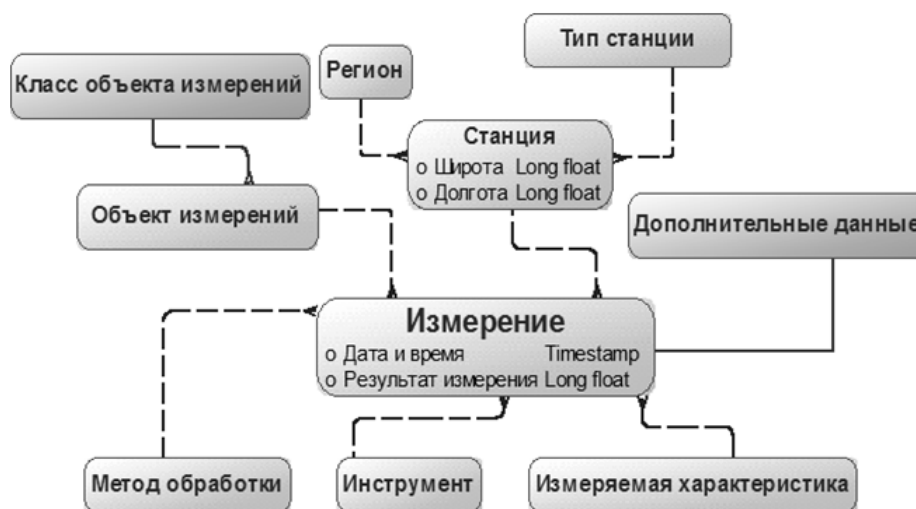


Рис. 1. Структура логической модели данных.

Реализация

На основе логической модели данных создана Веб-ориентированная информационно-вычислительная систем (ИС), позволяющая специалистам по экологии и биохимии получать доступ к данным биологических наблюдений и средствам обработки. Данные наблюдений, как правило, сохранялись в разнообразных форматах (от текстовых до табличных), поэтому были разработаны алгоритмы преобразования этих форматов к единому XML-формату для хранения в базе данных.

Для установления взаимосвязи концентраций следовых элементов в объектах окружающей среды (атмосферные аэрозоли, вода) и многоэлементного состава тканей живых организмов был создан блок математической обработки на основе пакетов NumPy, SciPy, распространяемых по открытым/свободным лицензиям: включающий программы

- 1) регрессионного анализа (построение доверительных интервалов);
- 2) кластерного анализа (k-means с алгоритмом KMeans++, иерархическая кластеризация с алгоритмом самоподстройки);
- 3) факторного анализа (PCA. Maximum Likelihood, критерий каменной осыпи);
- 4) дискриминантного анализа (линейный, квадратичный);
- 5) статистическая проверка гипотез (критерий Стьюдента).

На основе этого инструментария были созданы алгоритмы позволяющие обнаружить взаимосвязь концентраций следовых элементов в объектах окружающей среды (атмосферные аэрозоли, вода) с многоэлементным составом тканей живых организмов.

Результаты работы модуля

На рис. 2 показана линейная функция описывающая зависимость концентрации химических элементов в биосубстрате от их содержания в Атмосферном аэрозоле с 95% доверительным интервалом.

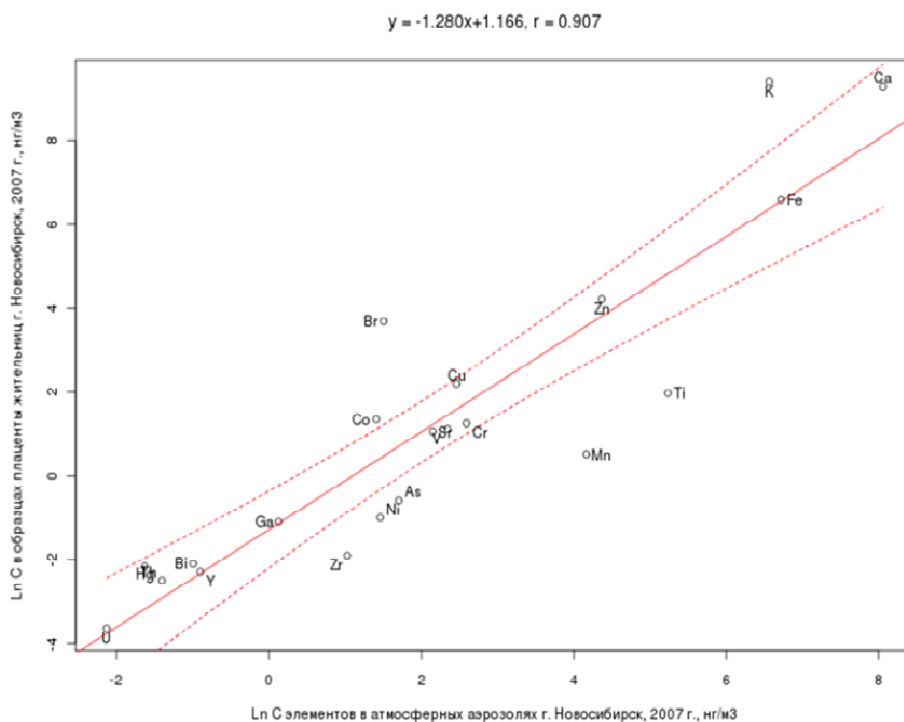


Рис. 2. Атмосферные аэрозоли-плацента. Новосибирск 2007 г.

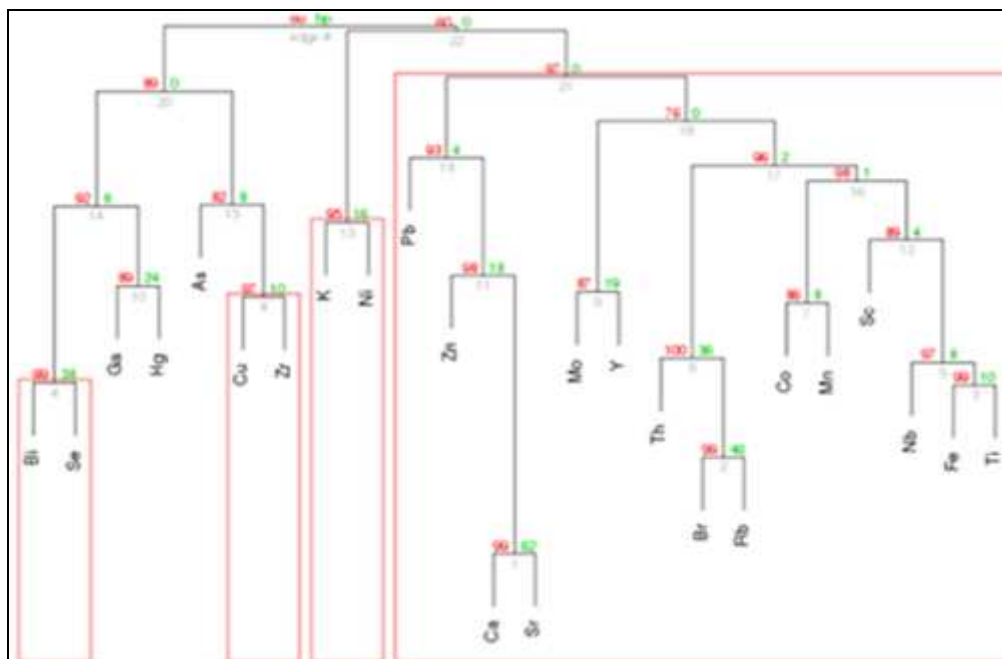


Рис. 3. Дендрограмма элементного состав атмосферного аэрозоля и плацент.

На рис. 3 представлена дендрограмма элементного состав атмосферного аэрозоля и плаценты. AU (Approximately Unibased) и BP (Bootstrap Probability p-values) аппроксимируют уровень значимости для кластера. AU=98 обозначает, что гипотеза разрушения кластера при добавлении новых наблюдений будет отвергнута с уровнем значимости 0.02. Цветом выделены кластеры, у которых AU>=95. Они наиболее устойчивы к возможному увеличению количества наблюдений.

Заключение

Решена задача преобразования разнообразны форматов хранения данных (от текстовых до табличных) и созданы алгоритмы для обнаружения взаимосвязи концентраций следовых элементов в объектах окружающей среды (атмосферные аэрозоли, вода) с многоэлементным составом тканей живых организмов.

Создан прототип ядра распределенной модульной информационной системы реального времени, для задач сбора, хранения и предварительной обработки данных измерений количества химических элементов, содержащихся в атмосферных аэрозолях, и их содержание в тканях биологических объектов.

Это позволит получить качественные и количественные оценки влияния химических элементов, содержащихся в атмосферных аэрозолях, на их содержание в тканях биологических объектов и в компонентах питания населения обследуемого региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 09-07-00277) и Интеграционной программы СО РАН (проект № 50).

Литература

1. Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера // Мысль. 1967. Т. 376. С. 74.
2. John W. Relationship between trace element concentrations in human blood and atmospheric aerosol // The Science of The Total Environment. 1983. Vol. 27, N 1. P. 21-32.
3. Куценогий К.П., Савченко Т.И., Чанкина О.В., Попова С.А. Взаимосвязь элементного состава живых организмов, атмосферных аэрозолей, компонентов питания. // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. Т. 2. С. 145-152.
4. Куценогий К.П., Савченко Т.И., Чанкина О.В. и др. Элементный состав крови и волос коренных жителей Севера России с разной биогеохимической средой обитания // 2010. Vol. 1. P. 51-61.
5. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека. Копенгаген: Региональные публикации ВОЗ // Европейская серия. 2001. № 5. С. 293.
6. ГОСТ 17.2.1.03-84. Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения.

Уточнение исходной сейсмичности на примере трассы железной дороги «Курагино – Кызыл»

С.А. Перетокин¹, К.В. Симонов²

¹СКТБ «Наука» СО РАН КНЦ СО РАН, Красноярск

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Введение

Исследование посвящено обсуждению методических и информационных аспектов вычислительной технологии оценки сейсмической опасности и содержит расчеты параметров уточненной по отношению к общему сейсмическому районированию сейсмической опасности для изучаемой территории трассы железной дороги «Курагино-Кызыл».

Цель работы: в соответствии с методологией общего сейсмического районирования ОСР-97 выполнить исследования по уточнению исходной сейсмичности для трассы железнодорожной линии «Курагино-Кызыл».

Основные задачи.

1. Выполнить анализ существующих каталогов землетрясений для 350-километровой зоны вдоль трассы проектируемой железной дороги. Выделить периоды уверенной регистрации для интервала магнитуд 2.0 – 6.5 с шагом 0.5, определить минимальные представительные магнитуды по каждому каталогу и получить характеристики графика повторяемости землетрясений для данной территории.
2. Из общего количества зон ВОЗ региона по базе данных ИФЗ РАН выделить наиболее опасные для проектируемой трассы. Провести детализацию модели зон ВОЗ для 100-километровой зоны вдоль трассы проектируемой железнодорожной линии. Определить координаты и сейсмические характеристики линеаментов и доменов, использованных для количественной оценки параметров сейсмической опасности для различных участков трассы.
3. По двум моделям зон ВОЗ (ИФЗ РАН и детализированной) выполнить количественную оценку исходной (фоновой) сейсмической интенсивности (сотрясаемости) для средних грунтовых условий (грунты II категории по таблице 1 СНиП II-7-81*) в баллах шкалы MSK-64 с точностью до 0,1 балла для отдельных точек трассы с интервалом 9 км и показать устойчивость полученных оценок.
4. Разработать элементы деагрегационного анализа сейсмической опасности и для точек трассы с интервалом 9 км выполнить расчеты параметров модальных землетрясений с учетом периода повторяемости сотрясений.

Район исследований: трасса, проектируемой железнодорожной линии, располагается в пределах Алтае-Саянской складчатой области и приурочена к Саяно-Тывинской тектонической мегазоне.

В административном отношении трасса расположена на территории Курагинского, Каратузского, Ермаковского районов Красноярского края и Пий-Хемского, Кызыльского районов Республики Тыва.

1. Анализ сейсмического режима территории

В настоящее время в районе проектируемой железнодорожной линии функционируют пять цифровых сейсмических станций ГС СО РАН (г. Новосибирск) и сейсмическая сеть Красноярского края, которая насчитывает двенадцать станций [5]. С 2008 г. в рамках федеральной программы в Алтае-Саянском регионе Экологическим центром «РОПР» (КНЦ СО РАН, г. Красноярск) развернута сеть из десяти сейсмических станций.

В качестве исследуемой территории для оценки сейсмической опасности выбран участок, включающий 350 км зону вдоль трассы проектируемой железнодорожной линии. Согласно принятой зависимости «интенсивность-расстояние-магнитуда» для Северной Евразии, землетрясения с эпицентрами на данном участке полностью определяют сейсмическую опасность выше 5 баллов по шкале MSK 64 (сотрясение от события с $M = 8.0$ затухает до 5 баллов на расстоянии около 350 км).

Для оценки сейсмического режима исследуемого района использованы три каталога сейсмических событий различных организаций. Сводный каталог №1 Алтае-Саянской опытно-методической сейсмологической экспедиции (г. Новосибирск), включающий в себя 9 землетрясений, произошедших с 1858 по 1961 гг., а также землетрясения, зарегистрированные с 1962 по 1999 гг. Каталог №2, включающий землетрясения, зарегистрированные сейсмической сетью КНИИГиМС (г. Красноярск) с 01.01.2002 по 31.08.2010 гг., и землетрясения, зарегистрированные сейсмической сетью ЭЦ «РОПР» с 10.06.2008 по 25.06.2010 гг. Полученные результаты сравнивались с оценками сейсмического режима, выполненными на основе специализированного каталога землетрясений Северной Евразии без афтершоков (ответственные редакторы: Н.В. Кондорская, В.И. Уломов) (каталог №3), включающий события с древнейших времен до 1990 года с $M \geq 4,5$ и с 1960 по 1990 гг. с $M \geq 3,5$ (актуализирован до 2008 г., ответственный редактор В.И. Уломов).

Во всех каталогах приводятся координаты эпицентров землетрясений, время в очаге по Гринвичу; в каталоге №1 и №2 – энергетические классы, а в каталоге №3 – магнитуды MLN. Исходя из

опубликованных сейсмологических бюллетеней ГС СО РАН, а также на основе данных БОМСЭ СО РАН, для пересчета шкалы Энергетического класса (Каталог №1, №2) в магнитудную шкалу MLH использовались корреляционные зависимости Раутиан и А.А. Гусева: $MLH=0.54 * K - 1.95$.

Для оценки сейсмического режима исследуемого района, а также для расчета графиков повторяемости сейсмических событий характеризующих основные структурные элементы модели зон ВОЗ, выполнен анализ представительности данных каталогов.

Из проведенных расчетов следует, что для каталога №1 выделяется два представительных периода для землетрясений с магнитудой меньше 5.5 (1972–1990 гг., 1993–2000 гг.) и один для землетрясений с магнитудой 5.5 ± 0.2 (1974–2000 гг.). Каталог №2 для оценки сейсмического режима можно использовать только с 2004 г. по 2010 г. Для каталога №3 представительные периоды распределились следующим образом: магнитуды в интервале от 3,5 до 5,0 – 1971–2008 гг.; магнитуда 5,5 – 1928–2008 гг., магнитуды более 5,5 – 1905–2008 гг. Основываясь на перечисленных периодах представительной регистрации построены графики повторяемости сейсмических событий в год для 350 км зоны вдоль трассы проектируемой железнодорожной линии и рассчитана следующая зависимость количества землетрясений в год на 1000 км^2 : $Lg(N) = -0.84 * MLH + 1.38$.

Из анализа графиков повторяемости определено, что минимальными представительными уровнями магнитуд являются: каталог № 1 – $MLH=2.0 \pm 0.2$; каталог № 2 – $MLH=2.5 \pm 0.2$; каталог № 3 – $MLH=3.5 \pm 0.2$. Таким образом, на основе трех каталогов сейсмических событий получены оценки сейсмического режима 350-километровой зоны вдоль проектируемой железнодорожной линии трассы «Курагино-Кызыл».

2. Методика оценки сейсмической опасности

Официальным документом, определяющим уровень фоновой сейсмичности и влияние грунтовых условий для территории Российской Федерации, является СНиП-II-7-81* и комплект карт ОСР-97, созданный в ОИФЗ РАН с привлечением научно-исследовательских Институтов РАН [9]. С точки зрения инженера-строителя на картах ОСР-97 отображена сейсмичность (в терминологии СНиП-II-7-81*), т.е. то значение балла, которое, с поправкой за грунтовые условия, является исходным данным для расчета сейсмической нагрузки на сооружение. В СНиП-II-7-81* (2002) Госстроем России строительные объекты подразделены на категории А, В, С. Определено, что карта ОСР-97-А предназначена для использования в массовом строительстве, карты ОСР-97-В и ОСР-97-С – для строительства объектов повышенной ответственности и особо ответственных.

В целом задача оценки сейсмичности территорий или отдельных площадок строительства, а также назначение количественных характеристик возможных сейсмических воздействий (максимальных ускорений, преобладающих периодов и продолжительности колебаний, акселерограмм, спектров реакции и т.д.) решается в три этапа: I – использование комплекта нормативных карт общего сейсмического районирования ОСР-97 и списка населенных пунктов в СНиП II-7-81*, 2002 г.; II – проведение детального сейсмического районирования ДСР территорий, в пределах которых проектируется строительство особо ответственных объектов, или уточнение исходной сейсмичности УИС и уточнение общего сейсмического районирования УОСР на территориях проектирования объектов массового строительства и повышенной ответственности; III – проведение сейсмического микрорайонирования.

Методика и результаты исследований по созданию комплекта карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации (ОСР-97) описаны в работах В.И. Уломова [3-4, 7-9]. Идентификация зон возникновения очагов землетрясений (зоны ВОЗ) и определение параметров их сейсмического режима является самым сложным и наиболее ответственным звеном в исследованиях по сейсмическому районированию, поскольку от этого зависит надежность всех последующих построений.

В основу создания модели источников землетрясений положена линеаментно–доменно–фокальная (ЛДФ) модель зон ВОЗ [7]. В ЛДФ-модели рассматриваются следующие четыре масштабных уровня: крупный регион с интегральной характеристикой сейсмического режима и три его основных структурных элемента – линеаменты, домены и потенциальные очаги землетрясений. Все получаемые характеристики сейсмического режима и отклонений сейсмических очагов от оси линеаментов используются при моделировании прогнозной (виртуальной) сейсмичности, в расчете повторяемости сейсмических сотрясений и при сейсмическом районировании.

Модель зависимости сейсмического эффекта от магнитуды и расстояния – $I(M, r)$ основана на региональных эмпирических данных и представлениях о некогерентном протяженном очаге [1], представляемом в виде излучающей площадки прямоугольной формы, длинная сторона которого параллельна дневной поверхности. Наклон плоскости очага по падению обусловлен моделью основных структурных элементов в модели зон ВОЗ. Землетрясение характеризуется моментной магнитудой. Длина и ширина площадки и их соотношение зависят от магнитуды и сброшенного напряжения.

В основу расчета повторяемости сейсмических воздействий различной интенсивности на изучаемой территории и сейсмического районирования положена виртуальная сейсмичность, полученная путем «разыгрывания» случайным образом гипотетических очагов землетрясений из продленного во времени

синтетического каталога и в соответствии с созданной моделью зон ВОЗ. При этом каждое событие в каталоге характеризуется моментной магнитудой, длиной, шириной, азимутом простирания и углом падения площадки очага, географическими координатами и глубиной гипоцентра.

На заключительной стадии работ по оценке сейсмической опасности интенсивность сотрясений земной поверхности вычисляется от каждого виртуального очага с учетом его размера и закона затухания сейсмических сотрясений с расстоянием. Расчеты производятся для каждого узла квадратной сетки, покрывающей с определенным шагом всю исследуемую территорию (в ОСР-97 принят шаг 25×25 км², в данных исследованиях по УИС для трассы он уменьшен до 2×2 км² и менее). Затем, «опрашивая» каждый из виртуальных очагов и учитывая затухание сейсмического эффекта с расстоянием, для каждого узла сетки создается гистограмма, нормированная на заданное время T , частоты N проявления той или иной сейсмической интенсивности I .

Гистограммы являются основой для расчетов и последующего картирования периодов повторяемости сейсмических воздействий разной балльности и сейсмической опасности. Повторяемость балла I за T лет – число землетрясений, вызывающих сотрясения с баллом $\geq I$. Повторяемость в среднем 1 раз за T лет означает, что вероятность превышения балла I в течение t лет (т.е. произойдет хотя бы одно такое событие) равна $p = 1 - \exp(-t/T)$ и при $t \ll T$; $p = t/T$. Например, при $T = 500$ и $t = 50$ лет «р» составляет $\sim 10\%$ (точное значение – 9,52); при $T = 1000$ лет и $t = 50$ лет $p \sim 5\%$ (точное значение – 4,88). Так, задаваясь тем или иным значением периодов повторяемости $T = 1/N$ (например, $T = 500, 1000$ и 5000 лет), рассчитываются соответствующие карты сейсмического районирования рассматриваемой территории. Фиксируя определенное значение сейсмической интенсивности (балльности), можно построить карты периодов ее повторяемости.

3. Характеристика зон возникновения очагов землетрясений

Основой для оценки сейсмической опасности (определения исходного балла) района исследований являлась модель сейсмичности Алтае-Саянского региона – карта зон ВОЗ и их параметры. Модель зон ВОЗ составлена на основе карты сейсмогенерирующих структур, созданной, в свою очередь, в результате анализа всего необходимого и имеющегося для ее составления геолого-геофизического, тектонического и сейсмологического материала [2].

Размеры территории и выбор зон ВОЗ обусловлен расположением относительно трассы и магнитудами тех сейсмических событий, которые вызывают по трассе сотрясения в 5,5 и более баллов. Приведены расстояния, на которых землетрясения разных магнитуд создают сотрясения в 5,5 баллов. Оценки получены по зависимости «интенсивность (балл)-магнитуда-расстояние» для данного региона с учетом возможного разброса макросейсмических данных [1]. Именно эти расстояния определили территорию, на которой показаны зоны ВОЗ. Используя ограничения из модели зон ВОЗ ОСР-97 Алтае-Саянского региона, выбраны линеаменты и домены, способные вызвать по трассе проектируемой железнодорожной линии сотрясения в 5,5 и более баллов.

Сейсмический режим линеаментов. Согласно «Предложений по уточнению сейсмической опасности, представленной на картах общего сейсмического районирования – ОСР», авторы: В.И. Уломов, Л.С. Шумилина, В.Г. Трифонов, А.А. Гусев, одной из задач является уточнение сейсмического режима исследуемой территории и детализация генерализованных моделей зон ВОЗ в части перераспределения сейсмических потоков для магнитуд менее 6.0 от доменов в линеаментные структуры.

В работе описана модель распределения сейсмического потока для территории между структурными элементами модели зон ВОЗ, используемыми далее при расчете карт ОСР-97. Линейные зоны возникновения очагов землетрясений (*линеаменты*), выделяемые в каждом сейсмоактивном регионе, подчинены геометрии долгоживущих сейсмоактивных разломов. Для генетически единого сейсмоактивного Алтай-Саяно-Байкальского региона на базе унифицированного каталога землетрясений составлен региональный график среднегодовой повторяемости сейсмических событий для магнитуд ≥ 6.0 (с шагом 0,5 единицы магнитуд), далее, сейсмический поток распределяется пропорционально длине по всем линеаментным структурам региона. На основе анализа сейсмичности Алтай-Саяно-Байкальского региона $MLH > 6.0$ (каталог №3) и графиков накопленных событий рассчитаны сейсмические потоки для линеаментов всего региона. Отметим, что с 1998 года по 2010 год в регионе произошло всего четыре землетрясения с магнитудой ≥ 6.0 .

На основе анализа графиков накопления событий показано, что за 12 лет (1998-2010 гг.) прошедших со времени опубликования карт-ОСР-97 принципиальных изменений сейсмического режима землетрясений с магнитудой более 6.0 не проявляется. Кроме того, региональные геофизические исследования (МОВЗ, МТЗ, АМТЗ) проводимые в регионе (в том числе вдоль проектируемой железнодорожной линии) в рамках федеральных программ [5] не выявили структур, которые можно было бы интерпретировать как новые (неучтенные в модели зон ВОЗ ОСР-97) активные разломы, способные сгенерировать землетрясение магнитудой более шести. Соответственно оснований для пересмотра потоков линеаментов Алтай-Саяно-Байкальского региона нет.

Сейсмический режим доменов. Сейсмический режим доменов в модели зон ВОЗ ОСР-97 определяется на основе выборки из каталога всех произошедших в пределах домена землетрясений с

$MLH \leq 5.5$. Выше были приведены оценки повторяемости землетрясений с магнитудой $MLH \leq 5.5$ для 350 км зоны вокруг проектируемой железнодорожной линии. Видно, что верхний предел расстояния, на котором землетрясения магнитуды 5.5 вызывают сотрясения 5 баллов – 100 км. Проанализировав сейсмичность в 100 км зоне трассы проектируемой дороги (каталоги № 1, 2, 3), а также основываясь на периодах уверенной регистрации и минимальных представительных магнитудах используемых каталогов, рассчитаны некумулятивные графики повторяемости для землетрясений с магнитудой $MLH \leq 5.5$.

Выполнено сравнение графиков повторяемости землетрясений для 350 км зоны, 100 км зоны и оценен суммарный сейсмический поток в доменах 300, 301, 308, 316, 322. Суммарный сейсмический поток доменов рассчитывался исходя из площади, которую каждый домен занимает в 100 км зоне вокруг проектируемой железнодорожной линии:

$$N_{MLH} = \left(\frac{N_{MLH}^{D300} \cdot S_{100км}^{D300}}{S^{D300}} + \frac{N_{MLH}^{D301} \cdot S_{100км}^{D301}}{S^{D301}} + \frac{N_{MLH}^{D308} \cdot S_{100км}^{D308}}{S^{D308}} + \frac{N_{MLH}^{D316} \cdot S_{100км}^{D316}}{S^{D316}} + \frac{N_{MLH}^{D322} \cdot S_{100км}^{D322}}{S^{D322}} \right) * \frac{1}{S_{100км}},$$

где N_{MLH}^{D300} – количество событий в год в домене D300 с магнитудой MLH , $S_{100км}^{D300}$ – площадь занимаемая доменом D300 в 100 км зоне вокруг проектируемой железнодорожной линии трассы, S^{D300} – площадь домена D300, $S_{100км}$ – площадь 100-километровой зоны вокруг проектируемой железнодорожной линии. Все три графика нормированы, приведены к 1 году и единичной площади 1000 км^2 .

Показано, что графики повторяемости землетрясений характеризуются близким углом наклона, что говорит о близких пропорциях распределения количества слабых и сильных землетрясений, но существенно разнесены по их повторяемости. Это объясняется неоднородностью сейсмической активности региона, поскольку 350-километровая зона вокруг проектируемой железнодорожной линии трассы включает в себя сейсмически активный север Монголии и южные районы республики Тыва (рис. 1).

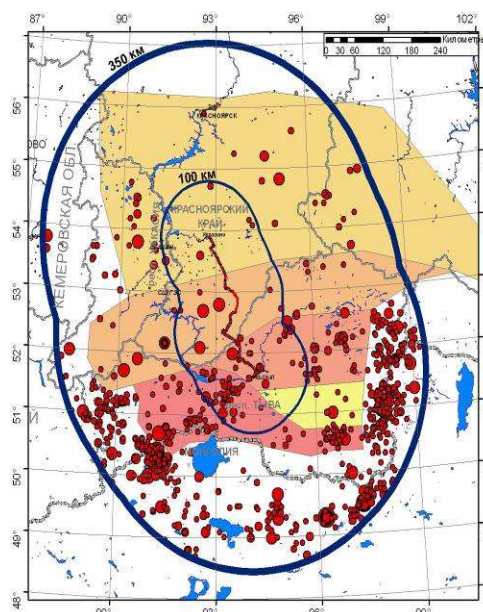


Рис. 1. Сейсмичность 350-км зоны трассы проектируемой железнодорожной линии.

Таким образом, можно сделать вывод, что сейсмическая активность 100-километровой зоны соответствует заложенным в домены графикам повторяемости, и в целом по 350-километровой зоне данный участок территории можно считать сейсмически умеренным. Однако, чтобы избежать занижения оценок сейсмической опасности, при расчете повторяемости сотрясений целесообразно использовать именно сейсмические потоки, заложенные в домены модели зон ВОЗ ОСР-97.

4. Детализация модели зон ВОЗ района трассы

Как отмечено выше, одним из требований при проведении УИС на основе методологии ОСР-97 является детализация модели зон ВОЗ: нижний уровень магнитуд линеаментов должен быть понижен, при этом необходимо учитывать особенности иерархического ветвления линеаментов; верхний магнитудный уровень доменов может быть понижен в соответствии с понижением уровня магнитуд землетрясений в линеаментных структурах. Контролем правомерности построения модели основных структурных элементов зон ВОЗ при УИС служит сопоставление распределения числа линеаментов разного ранга с конфигурацией графиков повторяемости землетрясений для исследуемой территории.

При корректировке модели зон ВОЗ необходимо также учитывать особенности иерархического ветвления линеаментов, как правило, общая протяженность линеаментов меньшего ранга значительно превосходит суммарную длину линеаментов более высокого ранга. В соответствии с этими представлениями рассчитана суммарная длина подлежащих картированию линеаментов с магнитудой 5.5.

Основываясь на указанных данных, детализация линеаментных структур была проведена с $M_{max}=5.5$ в 100-километровой зоне трассы проектируемой железнодорожной линии. В соответствии с полученной зависимостью суммарная длина линеаментов $M_{max}=5.5$ в 100-километровой зоне трассы должна составлять порядка 5500 км (~3000 км новых линеаментов).

Картирование линеаментных структур $M_{max}=5.5$ осуществлялось с использованием результатов неотектонического анализа [2]. В качестве основы для дешифрирования выбрана объемная цифровая модель рельефа, в построении которой использовались данные, полученные при дистанционном зондировании Земли комплексом Shuttle Radar Topography Mission.

Сейсмический поток линеаментов $M_{max}=5.5$ рассчитывался исходя из удельной повторяемости землетрясений данной магнитуды тех доменов, на территорию которых они попали. Перенос землетрясений с магнитудой 5.5 из сейсмического потока доменов в линеаменты представляет собой реорганизацию модельной сейсмичности региона, а именно структурирование землетрясений $M=5.5\pm 0.2$ вокруг линеаментов с учетом стандартного отклонения σ_m смещения очага, этот эффект показан на рисунке 2. Поток землетрясений $M=5.5$ для 100-километровой зоны трассы остался прежним. В соответствии с методикой ОСР-97, на основе исходной и детализованной моделей зон ВОЗ синтезированы модельные каталоги сейсмических событий на 500000 лет и из них выбраны землетрясения с магнитудой 5.5 ± 0.2 .

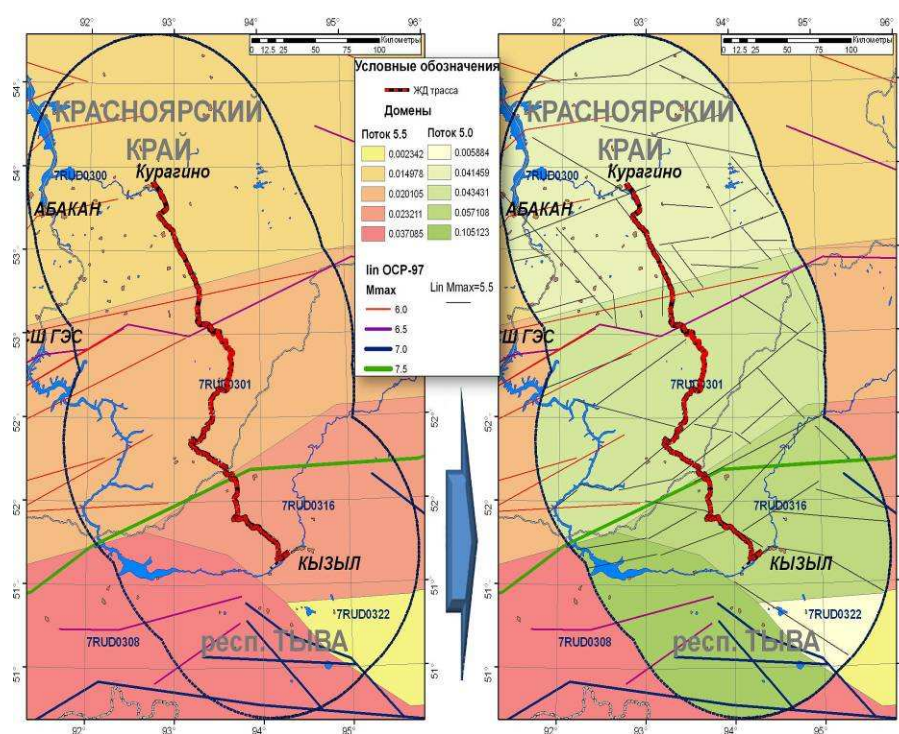


Рис. 2. Детализация модели.

Дальнейшие расчеты сейсмической опасности для проектируемой железнодорожной линии трассы Кызыл–Курагино проводились для двух моделей зон ВОЗ.

5 Расчет сейсмической опасности

При уточнении сейсмической опасности и карты ОСР-97 для изучаемой территории использовалась модель сейсмического воздействия, связывающая «интенсивность (балл), – магнитуду и расстояние» [1]. Связь «интенсивность (балл) – магнитуда – расстояние $I(M,r)$ » моделируется по эмпирическим данным о сейсмическом режиме в регионе, которые описаны выше. Расчет интенсивности сотрясений выполнялся с использованием программного комплекса EAST-2003, разработанного в 2003 году на основе методики ОСР-97 под руководством В.И. Уломова (ИФЗ РАН, г. Москва). Основу программного комплекса EAST-2003 составляет пакет программ PRB, разработанный А.А. Гусевым, В.М. Павловым и Л.С. Шумиловой. Расчет интенсивности проводился для периодов повторяемости 500, 1000, 5000 лет, время моделирования каталога принималось равным $T=500\ 000$ лет.

Для проверки устойчивости оценок сейсмической опасности проведен расчет для грунтов II категории вдоль трассы проектируемой железнодорожной линии с шагом 9 км на основе двух моделей зон ВОЗ. Показано, что результаты расчета по двум моделям зон ВОЗ не расходятся более чем на 0.1 балла, что не выходит за пределы точности метода. Несмотря на то, что модельная сейсмичность, землетрясения с магнитудой $MLH=5.5\pm 0.2$, перераспределилась пропорционально сейсмическим потокам по линейам с $M_{max}=5.5\pm 0.2$, повторяемость сотрясений изменились незначительно. В данном случае это связано с высокой плотностью линейметов $M_{max}=5.5\pm 0.2$ в 100-километровой зоне проектируемой железнодорожной линии, несмотря на структурирование модельной сейсмичности вдоль их осей, сейсмический эффект вызываемый генерируемыми землетрясениями в расчетных точках практически не изменился.

Для 50-километровой зоны вокруг проектируемой железнодорожной линии трассы выполнен расчет интенсивности сотрясений с интервалом 0.1 балла для сетки приемников с шагом 2x2 км на основе модели ОСР-97. Полученные данные интерполированы и представлены в виде изолиний на рисунке 3. Площадные расчеты выполнялись по исходной модели зон ВОЗ ОСР-97.

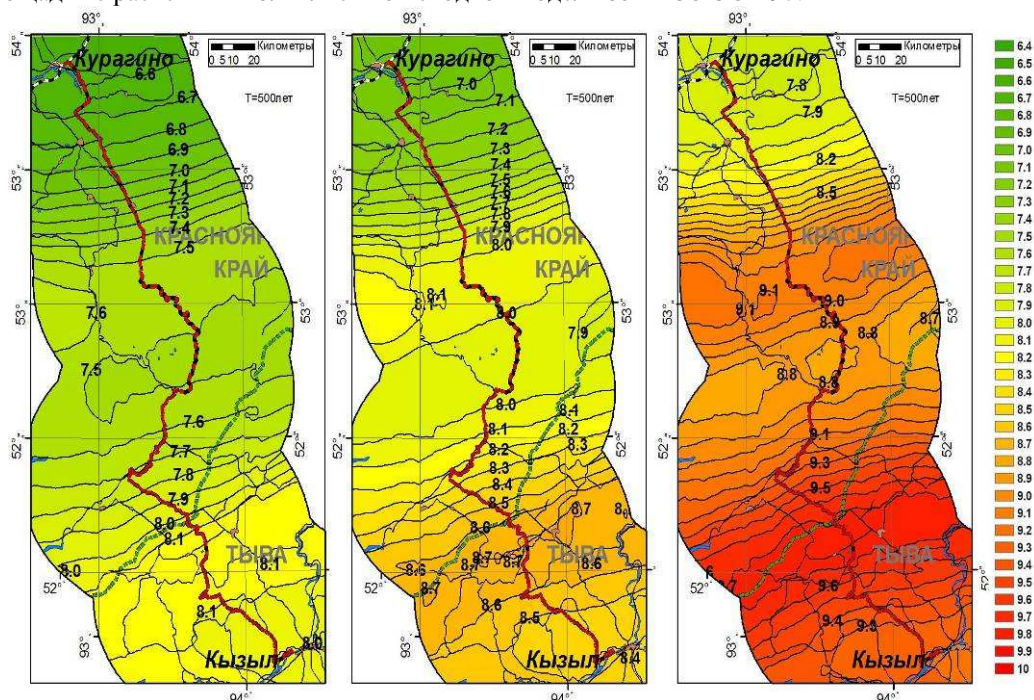


Рис 3. Результаты расчетов интенсивности сотрясений для трассы шириной 50 км

В основу расчета повторяемости сейсмических воздействий различной интенсивности на изучаемой территории и ее сейсмического районирования положена виртуальная сейсмичность, полученная путем «разыгрывания» случайным образом гипотетических очагов землетрясений из продленного во времени синтетического каталога и в соответствии с созданной моделью зон ВОЗ. При этом каждое событие в каталоге характеризуется моментной магнитудой, длиной, шириной, азимутом простирания и углом падения площадки очага, географическими координатами и глубиной гипоцентра. С модельным каталогом можно работать так же, как и с обычным наблюдаемым каталогом: строить графики повторяемости, карты проекций площадок очагов на поверхность (аналог карты реальных очагов), вертикальные разрезы очаговых зон и т.п.

Вычисление сейсмического эффекта выполнено для каждой точки проектируемой железнодорожной линии трассы с шагом 9 км с учетом влияния каждого модельного очага землетрясения и модели сейсмического эффекта. Для каждой точки создается гистограмма, нормированная на заданное время T , частоты N проявления той или иной сейсмической интенсивности I . Если период времени разделить на частоту повторения различных сотрясений, получим значения их повторяемости.

Построены графики повторяемости сейсмических сотрясений для 45 точек трассы проектируемой железнодорожной линии с шагом 9 км. Гистограммы являются основой для расчетов и последующего картирования периодов повторяемости сейсмических воздействий разной балльности и сейсмической опасности. Задавая периоды повторяемости $T=500, 1000$ и 5000 лет, получены соответствующие значения сейсмической интенсивности. Зафиксировав значения сотрясаемости VI, VII, VIII, IX баллов, можно получить, соответственно, периоды их повторяемости.

В итоге, приведены рассчитанные на основе модельного каталога землетрясений периоды повторяемости сотрясений 6, 7, 8 и 9 баллов по шкале MSK-64 для различных точек трассы, а также расчетная интенсивность для периода 100, 500 и 1000 лет. Полученные оценки – совокупная сейсмическая опасность от потенциальных землетрясений различных магнитуд, происходящих на

разных расстояниях «источник-пункт», т.е. рассчитанная интенсивность, не связана с какой-либо отдельной магнитудой или расстоянием. Однако при дальнейшем сейсмическом микрорайонировании, для каждого проектируемого объекта трассы необходимо оценить спектры реакции подстилающих грунтов, исходя из спектральных характеристик наиболее вероятных землетрясений, вызывающих расчетные сотрясения, т.е. необходимо оценить наиболее вероятную магнитуду землетрясения и соответствующее расстояние «источник-пункт».

Этот процесс «деагрегации» требует, чтобы средняя годовая частота превышения была выражена как функция магнитуды и расстояния. Вычислительно это сводится к тому, что суммирование по магнитуде и расстоянию при вычислении частоты превышения не выполняется, а полученное 2-мерное по (M, R) распределение частоты далее делится на частоту превышения заданной интенсивности. Формально «деагрегация» представляет собой распределение условной вероятности события с параметрами (M, R) при условии, что нормативная интенсивность превышает в данном пункте. Ясно, что, также как и при расчете сейсмической опасности, определяющими здесь будут выбор сейсмической модели региона и функции затухания энергии сейсмических волн от очаговой зоны.

Основное назначение полученного распределения состоит в определении возможного сценария сейсмических событий и в определении значений магнитуды и расстояния до так называемого «проектного землетрясения». В качестве «проектного землетрясения» рекомендуется выбор «модального» (т.е. имеющего наибольшую вероятность) землетрясения. Магнитуда и расстояние «проектного землетрясения» являются основными характеристиками при выборе акселерограмм «землетрясений-аналогов».

Заключение

Представленное в работе информационное, методическое и алгоритмическое обеспечение вычислительной процедуры уточнения исходной сейсмичности УИС железнодорожной трассы «Курагино-Кызыл» позволило выполнить зонирование трассы проектируемой железнодорожной линии по уровню сейсмической опасности (без учета местных грунтовых условий), а также получить численные параметры (магнитуда, расстояние) проектных (модальных) землетрясений для различных по прогнозируемой сотрясаемости участков трассы.

Для получения детальных оценок сейсмической опасности с учетом проектируемых вдоль трассы сооружений составлен каталог с пикетной привязкой, содержащий различные объекты, тоннели, разъезды и станции. Для каждого объекта рассчитаны сотрясаемость для периодов повторяемости 100, 500 и 1000 лет (для тоннелей дополнительно 5000 лет), и параметры модальных землетрясений. Кроме того, для удобства проектировщиков, вся трасса была разбита на участки по степени сейсмической опасности (с привязкой по пикетам) с шагом 0.1 балла MSK-64, и для каждого из них рассчитаны параметры модальных землетрясений. Все участки объединены в группы по расчетной интенсивности сотрясений, магнитуде и расстоянию до модального землетрясения. При расчете обобщенных спектров реакции, на стадии сейсмического микрорайонирования, целесообразно использовать именно это деление на группы.

Литература

1. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Моделирование связи балл-магнитуда-расстояние на основе представления о некогерентном протяженном очаге // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 29-40.
2. Лобацкая Р.М., Краснораменская Т.Г. Объемная неотектоническая модель Алтае-Саянской складчатой области как основа для анализа и прогноза сейсмичности// Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской Академии Естественных наук «Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2008. Вып. 6 (32). С. 132-142.
3. Уломов В.И. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1993. Вып. 1. 303 с.
4. Уломов В.И. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2-3. 490 с.
5. Сибгатулин В.Г., Симонов К.В., Перетокин С.А. Оценка сейсмической опасности юга Центральной Сибири. Красноярск: КНИИГиМС, 2004. 194 с.
6. Уломов В.И. Об основных положениях и технических рекомендациях по созданию новой карты сейсмического районирования территории Российской Федерации // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. Вып. 2-3. С. 9-26.
7. Уломов В.И. Моделирование зон возникновения очагов землетрясений на основе решеточной регуляризации // Физика Земли. 1998. № 9. С. 1-20.
8. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8000000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.
9. Страхов В.Н., Уломов В.И. Карта на 4-х листах. М.: ОИФЗ-РОСКАРТОГРАФИЯ, 2000.

Численный анализ данных аэрозольных выпадений радионуклидов при аварийных выбросах в атмосферу

В.Ф. Ратуга

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

Введение

Проблема определения количественных характеристик радиоактивного загрязнения природных сред в результате аварий на атомных станциях и предприятиях ядерно-технологического цикла является весьма актуальной. Применение методов прямого моделирования переноса загрязняющих примесей в принципе дает возможность вполне корректного описания полей концентраций, но в данном случае этот подход сталкивается со значительными затруднениями обеспечения моделей соответствующей входной информацией. К ним следует отнести неопределенности высоты и мощности источника выброса радионуклидов в атмосферу, распределение в начальном облаке аэрозольных частиц по размерам и скоростям оседания, определение текущих метеорологических условий и т.д., что приводит к необходимости использования при численном моделировании дополнительной экспериментальной информации о полях загрязнения и создания соответствующих моделей реконструкции [1-3].

Следует также отметить, что при использовании постановок обратных задач нежелательно слишком детальное описание процессов переноса радионуклидов, поскольку это может привести к большим трудностям их обоснования и численной реализации. Необходимым этапом решения этих задач является анализ информативности используемой экспериментальной информации, планирования и оптимизации систем мониторинга [4, 5].

1. Модель реконструкции атмосферных выпадений полидисперсной примеси

Предварительный анализ полученных экспериментальных данных наблюдений аэрозольных выпадений радионуклидов показывает, что изменение их концентраций по мере удаления от места аварийного выброса может быть весьма значительным. Это позволяет сделать предположение о присутствии в их составе как крупных, так и достаточно мелких аэрозольных фракций. Для априорного описания распределения вещества примеси по скоростям оседания w в атмосфере воспользуемся следующей двухпараметрической функцией [6, 7]

$$N(w) = \frac{a^{m+1}}{\Gamma(m+1)} w^m e^{-aw}, \quad m \geq -1, \quad a = \frac{m}{w_m}, \quad (1)$$

где параметр w_m характеризует скорость преобладающей по количеству частиц фракции примеси, m - степень однородности распределения частиц примеси по скоростям w , $\Gamma(m)$ - гамма-функция Эйлера.

Исходным моментом для расчета поля выпадений полидисперсной примеси от точечного источника является соотношение [6]

$$p = \int_0^{\infty} w q_w N(w) dw, \quad (2)$$

где q_w - поле концентрации монодисперсной примеси со скоростью оседания w .

При расчете средней концентрации в приземном слое атмосферы определяющее значение имеют часто встречающиеся метеорологические условия. К ним относятся так называемые нормальные метеоусловия, для которых используется степенная аппроксимация скорости ветра и коэффициента вертикального турбулентного обмена [8]:

$$u(z) = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^n, \quad K_z = k_1 \frac{z}{z_1}, \quad (3)$$

где u_1 и k_1 - значения u и K_z при $z = z_1$.

С использованием соотношений (3) и аналитических решений уравнения турбулентной диффузии для относительно невысоких источников поле концентрации q_w вблизи земли можно представить в виде [9]

$$q_w(x, y) = \frac{M c^\omega}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+\omega) x^{1.5+\omega}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right). \quad (4)$$

Здесь ось x ориентирована в направлении ветра, ось y направлена в поперечном ветру направлении, M - мощность источника примеси, k_0 - параметр турбулентного обмена в направлении оси y ,

$$c = \frac{u_1 H^{1+n}}{(1+n)^2 k_1}, \quad \omega = \frac{w}{k_1 (1+n)}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (1), (4) выражение (2) можно представить в виде

$$p(x, y) = \frac{Ma^{m+1}}{2(1+n)\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \int_0^\infty \frac{w^{m+1} \exp(-aw)}{\Gamma(1+w)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega dw =$$

$$= \frac{Ma^{m+1}(1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x} - \frac{y^2}{4k_0 x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{m+1} \exp(-ak_1(1+n)\omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega. \quad (6)$$

В частности, для осевой концентрации ($y = 0$) соотношение (6) представляется в виде

$$p_{ось}(x) = \frac{\theta_1}{x^{1.5}} \exp\left(-\frac{c}{x}\right) \int_0^\infty \frac{\omega^{\theta_2} \exp(-\theta_3 \omega)}{\Gamma(1+\omega)} \left(\frac{c}{x}\right)^\omega d\omega,$$

$$\theta_1 = \frac{Ma^{m+1}(1+n)^{m+1} k_1^{m+2}}{2\sqrt{\pi k_0} \Gamma(1+m) x^{1.5}}, \quad \theta_2 = m+1, \quad \theta_3 = ak_1(1+n). \quad (7)$$

Исследование свойств функции (7) показывает, что она в интервале значений $x \in (0, \infty)$ достигает максимума в некоторой точке x_0 , монотонно возрастает при $x \in (0, x_0)$ и соответственно монотонно убывает в интервале значений $x \in (x_0, \infty)$ и стремится к нулю при $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$. Оценка неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 , входящих в соотношение (7), проводится методом наименьших квадратов с использованием данных измерений уровней радиации в точках местности. Следует также отметить, что величина c соответствует величине расстояния, на котором достигается максимальная приземная концентрация легкой примеси [9].

Замечание. Параметры θ_2 , θ_3 зависят от характеристик дисперсного состава аэрозольной примеси и метеорологических условий. Данное обстоятельство позволяет существенно снизить количество опорных точек измерений при проведении повторного оценивания осевого загрязнения в другие моменты времени. В этом случае достаточно лишь провести переоценку параметра θ_1 , который согласно (7) пропорционален мощности источника и изменение которого будет происходить лишь вследствие радиоактивного распада выпавших нуклидов.

2. Численные реконструкции осевой части следа, образовавшегося в результате аварии на Сибирском химическом комбинате (СХК) в 1993 г.

6 апреля 1993 г. на радиохимическом заводе в г. Томске-7 произошло разрушение емкости с радиоактивным раствором. Авария сопровождалась кратковременным залповым выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду через вентиляционную систему, вытяжную трубу высотой 150 м, а также развал стены здания на высоте 15 м. Выброс сформировался при устойчивом ветре и ушел в северо-восточном направлении. Распределение радиоактивного загрязнения местности изучалось с помощью самолетной гамма-съемки, а также наземных маршрутных наблюдений загрязнения снегового и почвенного покрова. Начальная протяженность следа с уровнем более 15 мкР/ч составила 28 км, наибольшая ширина – 6 км, площадь зоны загрязнения составила более 100 км² [10]. Дальнейшие наблюдения в мае-июне показали довольно быстрое снижение уровней загрязнения, что было обусловлено распадом короткоживущих радионуклидов - ¹⁰³Ru, ⁹⁵Nb, ⁹⁵Zr, ¹⁰⁶Ru, доминировавших в составе выброса [10-12].

На рис. 1,а представлена карта радиационной обстановки в районе аварии на СХК на 13 мая 1993 г., полученная по данным наземных измерений гамма-поля на высоте 1 м [11, 12]. К этому времени снеговой покров уже отсутствовал, что значительно упростило проведение наблюдений и анализ полученных экспериментальных результатов. С использованием данных, приведенных на рис. 1,а, и модельной зависимости (7) была проведена реконструкция осевой части следа. Для проведения оценивания неизвестных параметров θ_1 , θ_2 , θ_3 в качестве опорных уровней измерений были использованы уровни: 110, 240, 1000 мкР/ч. Результаты численного восстановления осевых выпадений радионуклидов по заданным трем опорным уровням измерений представлена на рис. 2,а. С использованием одной опорной точки на оси следа и оценок параметров θ_2 , θ_3 , взятых из предыдущего расчета был проведен численный анализ полей радиоактивного загрязнения от аварии на СХК к моментам времени 12 апреля и 13 июня 1993 г. На рис. 2,б-г приведены результаты восстановления выпадений нуклидов в осевых направлениях по данным аэро-гамма и наземной снеговой и почвенной съемки.

Анализ результатов моделирования показал вполне удовлетворительное согласие измеренных и вычисленных значений активности в контрольных точках измерений. Несмотря на значительную высоту источника произошло довольно быстрое снижение уровней загрязнения с расстоянием, что указывает на большую разнородность дисперсного выброшенной смеси радионуклидов. Тем не менее первоначальная протяженность следа составила не менее 40 км. Из сравнения значений вычисленных оценок параметров θ_1 для самолетной и наземной гамма-съемки снегового покрова вытекает, что в случае данной аварии

аэрозольная доза в среднем на 40% значения мощности дозы ниже. Анализ рис. 2,а и 2,в показывает заметное снижение в течение месяца уровня загрязнения почвы, что в первую очередь связано с процессами радиоактивного распада.

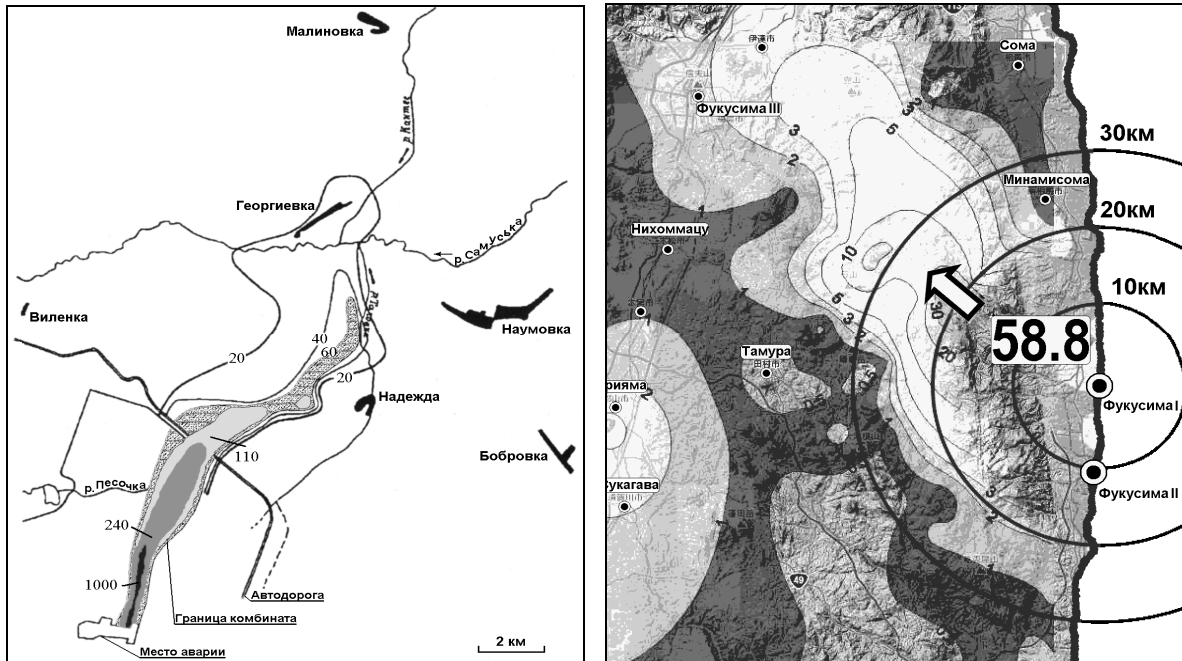


Рис. 1. Карты следов радиоактивных выпадений: *а* – загрязнение почвы от аварии на СХК по состоянию на 13 мая 1993 г. (мкР/ч); *б* – загрязнение почвы от серии взрывов на АЭС «Фукусима-1» по состоянию на 12 апреля 2011 г. (мкЗ/ч).

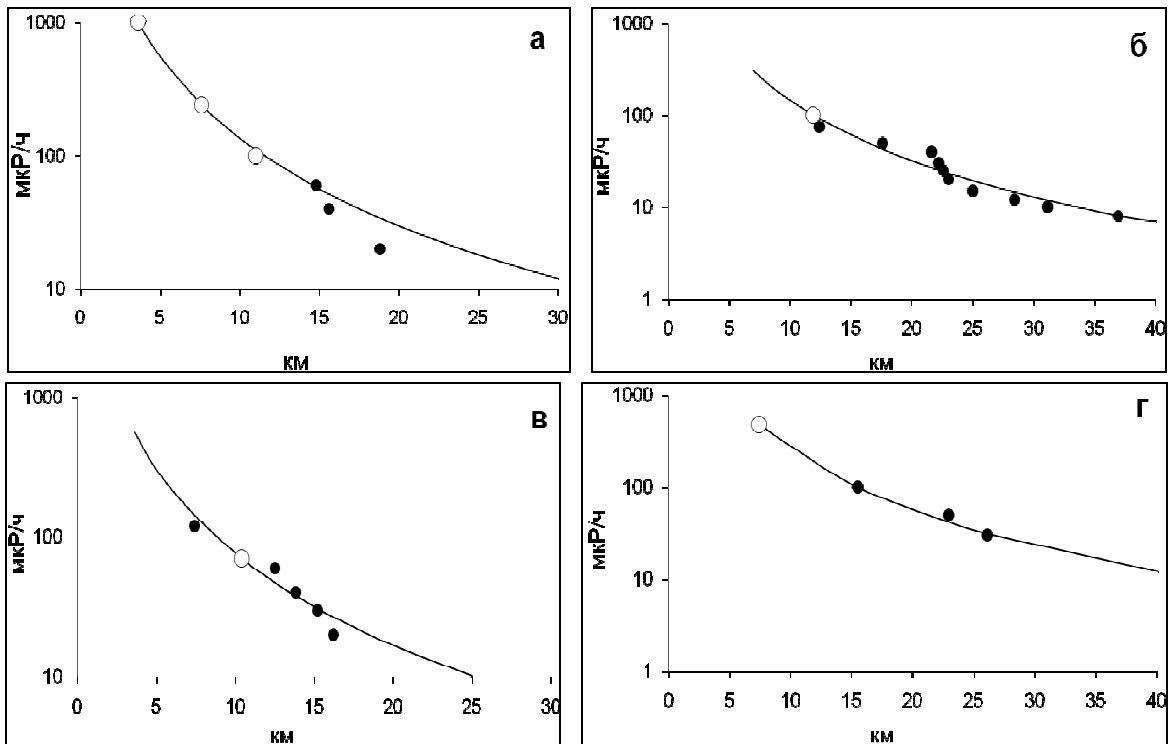


Рис. 2. Численно восстановленные по данным наблюдений уровни радиоактивного загрязнения почвы и снегового покрова от аварии на СХК 1993 г. вдоль оси следа: *а* – по состоянию на 13 мая; *б* – на 12 апреля (самолетная гамма-съемка); *в* – на 13 июня; *г* – на 12 апреля (наземные наблюдения). — - результат численного моделирования; \circ , \bullet - опорные и контрольные точки измерений.

3. Анализ данных наблюдений радиоактивного загрязнения почвенного покрова в региональных окрестностях АЭС «Фукусима-1»

Мощное землетрясение 11 марта 2011 г. у берегов Японии обусловило отключение на АЭС «Фукусима-1» централизованного электроснабжения, а последующее за ним катастрофическое цунами вывело из строя резервные дизель-генераторы, что не позволило в дальнейшем проводить эффективное охлаждения активных зон остановленных реакторов и в конечном итоге привело к серии мощных взрывов на станции с выбросом в атмосферу смеси радионуклидов, включающих радиоактивные изотопы йода, цезия. В частности в направлении на северо-запад от АЭС (префектура Фукусима) образовался след выпадений с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

В префектуре Фукусима ежедневно производится автомобильная радиационная разведка района загрязнения за пределами 20-ти километровой зоны вокруг АЭС. Данные этого мониторинга ежедневно появляются в открытом доступе на сайте Министерства образования, культуры, спорта, науки и технологии Японии (МЕХТ). В начальный период загрязнения (15-18 марта) максимальная мощность дозы в 30 км на северо-запад от АЭС составляла порядка 150-170 мкЗв/ч. В дальнейшем снижение мощности дозы на следе происходило довольно быстро, что указывает на наличие в составе выброса значительной доли коротко живущих радионуклидов. Количественная информация о радионуклидном составе выброса пока не опубликована.

На рис. 1,б представлена карта мощности доз (мкЗв/ч) на 12 апреля 2011 г., построенная на основании данных передвижного мониторинга. Максимальная доза в 20 км от АЭС на радиоактивном следе уже составила 58.8 мкЗв/ч. Для проведения численной реконструкции загрязнения по оси следа в качестве опорных точек измерений использовались точки со значениями доз 3, 5 и 10 мкЗв/ч. На рис. 3,а представлены результаты реконструкции осевой части следа, полученные с использованием соотношения (7), по указанным выше опорным значениям мощностей доз. Анализ результатов численного моделирования показывает, что восстановленная кривая вполне удовлетворительно описывает загрязнение по оси следа и что зависимость (1) достаточно адекватно воспроизводит спектр распределения выброшенных взрывами на АЭС частиц по скоростям оседания. Быстрый рост мощности доз в направлении к АЭС указывает на то, что подобную тенденцию следует ожидать и внутри 20 километровой зоны. Зависимость (7) позволяет провести оценивание уровней осевого радиоактивного загрязнения внутри рассматриваемой зоны до расстояний 5-10 км от АЭС. Для повышения точности описания уровней загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учет распределения активности по вертикали в момент выброса радионуклидной смеси.

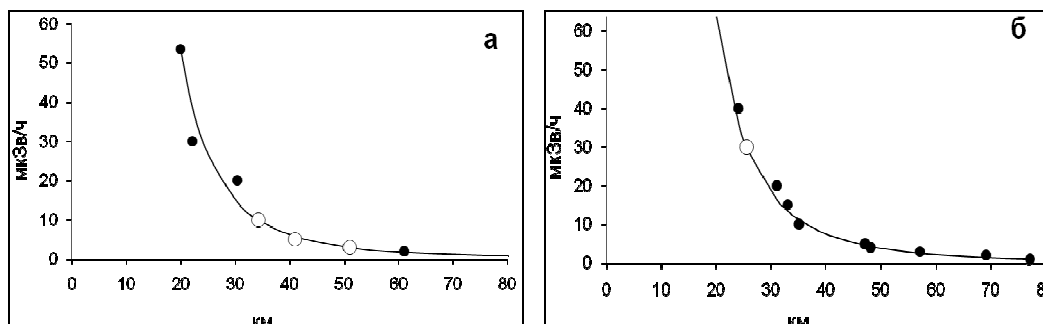


Рис. 3. Численная реконструкция осевой части следа радиоактивных выпадений от аварии на АЭС «Фукусима-1» по состоянию на 12 (а) и на 24 (б) апреля 2011 г.

Использование полученных оценок параметров θ_2 , θ_3 по состоянию радиационной обстановки на 12 апреля 2011 г. дали возможность провести анализ осевого загрязнения и для других сроков наблюдений по более ограниченной информации. В частности, на рис. 3б приведены результаты восстановления осевого загрязнения по одному значению уровня мощности доз по состоянию на 24 апреля 2011 г. Согласие данных радиационного мониторинга и численной реконструкции в диапазоне расстояний от 20 до 80 км дает подтверждение как надежности данных измерений, так и определенной универсальности полученных оценок параметров θ_2 , θ_3 применительно к рассматриваемому аварийному загрязнению территории.

Заключение

Разработанная малопараметрическая модель реконструкции выпадений полидисперсной примеси дает возможность численного анализа данных наблюдений практически по всей оси следа. Для получения оценок неизвестных параметров в зависимости (7) требуется привлечение относительно небольшого объема данных измерений. Как показал численный анализ данных радиационного мониторинга, весьма полезным приемом оказалось выделение группы параметров, зависящих от характеристик дисперсного состава, что позволило при восстановлении полей осевых концентраций в

другие моменты времени дополнительно сократить количество используемых уровней измерений. Весьма необходимой является информация о количественном составе выброшенной в атмосферу радионуклидной смеси. Ее наличие позволяет после проведения численной реконструкции поля выпадений нуклидов дать прогноз радиационной обстановки на последующие моменты времени.

Для анализа данных мониторинга аварийного загрязнения в ближней зоне необходим более детальный учет вертикального распределения относительной активности в облаке взрыва. В связи с этим полезно привлечение дополнительной априорной информации о характере и мощности взрыва.

Автор выражает благодарность В.А. Чиркову, Н.А. Прибатурину за представленную информацию и полезные обсуждения в процессе работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (Программы фундаментальных исследований № 4.4) и Интеграционной программы СО РАН (проект № 84).

Литература

1. Израэль Ю.А., Цатуров Ю.С., Назаров И.М. и др. Реконструкция фактической картины радиоактивного загрязнения местности в результате аварий и ядерных испытаний // Метеорология и гидрология. 1994. № 8. С. 5-18.
2. Андрюшин И.А., Чернышев А.К., Логачев В.А. и др. Современная интерпретация данных воздушной и наземной радиационных разведок следа первого ядерного испытания в СССР в 1949 г. // Вестник научной программы «Семипалатинский полигон – Алтай». 1995. № 2. С. 102-108.
3. Рапута В.Ф. Модели реконструкции загрязнения осевой части Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. Ч. 2, спецвыпуск. С. 10-16.
4. Успенский А.Б., Федоров В.В. Вычислительные аспекты метода наименьших квадратов при анализе и планировании регрессионных экспериментов. М.: Изд-во МГУ, 1975. 168 с.
5. Pitovranov S.E., Fedorov V.V., Edwards L.L. Optimal sampler siting for atmospheric tracer experiments taking into account uncertainties in the wind field // Atmos. Environ. 1993. Vol. 27A, N 7. P. 1053-1059.
6. Прессман А.Я. О распространении в атмосфере тяжелой неоднородной примеси из мгновенного точечного источника // Инженерно-физич. журн. 1959. Т. 2, № 3. С. 78-87.
7. Петров В.Н., Прессман А.Я. Оценка влияния турбулентного рассеяния по вертикали и в направлении ветра на распространение полидисперсной примеси // Докл. АН СССР. 1962. Т. 146, № 1. С. 86-88.
8. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
9. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
10. Израэль Ю.А., Артемов Е.М., Назаров И.М. и др. Радиоактивное загрязнение местности в результате аварии на радиохимическом заводе в Томске-7 // Метеорология и гидрология. 1993. № 6. С. 5-8.
11. Булатов В.И., Чирков В.А. Томская авария: мог ли быть сибирский Чернобыль? Новосибирск: ЦЭРИС, 1993. 32 с.
12. Вакуловский С.М., Шершаков В.М., Бородин Р.В. и др. Анализ и прогноз радиационной обстановки в районе аварии на Сибирском химическом комбинате // Радиация и риск. 1993. Вып. 3. Приложение 2. С. 3-48.

Мониторинг горных ледников: задачи, новые методы, перспективы

С.Ю. Самойлова

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Введение

В последние десятилетия одной из наиболее актуальных и при этом дискуссионных научных проблем является проблема глобального потепления. В настоящее время доказано, что мы находимся в теплой фазе ледниковой эпохи внутри четвертичного периода [7], начало которой приурочено ко второй половине XIX в. (конец так называемого Малого ледникового периода). Несмотря на научно-технический прогресс, жизнь современного человечества до сих пор в значительной степени зависит от природной среды, поэтому исследование природных систем в условиях изменения климата, несомненно, актуально.

В связи с этим большое значение имеют наблюдения за колебаниями ледников, т.е. изменениями их размеров и формы, вызванных изменениями внутреннего режима и климата. Обусловлено это в первую очередь тем, что они являются чувствительными индикаторами как местных, так и глобальных климатических изменений. Во-вторых, ледники являются источниками чистой пресной воды. В благоприятные периоды (похолодание или увлажнение) ледники накапливают вещество (снег и лед), а в неблагоприятные (потепление или иссушение) – отдают его в виде талого стока, изменяя при этом свои размеры и форму. При этом связь между колебаниями ледников и климатом достаточно сложная, поскольку ороклиматические условия сугубо индивидуальны для каждого ледника. Время ответной реакции горных ледников на климатические изменения может достигать от 10 до 100 лет и более [6]. Поэтому наблюдения за динамикой ледников должны носить многолетний систематический характер.

Исследования ледников на Алтае

На Алтае инструментальные наблюдения за ледниками начаты в конце XIX в. В 1985-1911 гг. Профессором Томского государственного университета В.В. Сапожниковым с помощью теодолита была выполнена топографическая съемка ледников массивов Белухи, Табын-Богдо-Ола, верховьев Чаган-Узуна, зафиксировано положение концов крупных ледников. Последующие полвека бо́льшая часть работ на ледниках Алтая была связана с именем М.В. Тронова. Помимо описания и каталогизации ледников, М.В. Троновым были изучены закономерности их пространственного распределения, механизмы взаимосвязи оледенения с рельефом и климатом.

Систематические исследования режима и динамики ледников были начаты в период Международного Геофизического года (МГГ, 1957-1958 гг.) и последовавшего за ним Международного Гидрологического Десятилетия (МГД, 1966-1975 гг.). Наблюдения за составляющими водного и ледового баланса, колебаниями ледников проводились в опорных бассейнах: в верховьях рек Мульта, Актру и Аккема. После окончания МГД исследования были продолжены под эгидой Международной Гидрологической Программы (МГП). Одновременно с МГП слежение за ледниками проводилось в рамках программы наблюдений за колебаниями ледников. Для выполнения этих двух программ в Советском Союзе были отобраны 7 горно-ледниковых бассейнов в различных регионах, на Алтае в качестве опорного бассейна был выбран бассейн верховьев р. Актру. После окончания МГП (1984 г.) материалы за составляющими водного и ледового балансов, а также за колебаниями ледников в бассейне были опубликованы [2]. В последние десятилетия значительная работа по наблюдению за ледниками проводилась сотрудниками ТГУ. Были получены количественные показатели изменения морфометрических параметров 120 ледников [3, 4].

На основе имеющихся материалов, а также современных исследований, выполняемых с использованием новых методик и новейшей техники, можно проследить динамику ледников за весь период инструментальных наблюдений, исследовать механизмы взаимосвязи климата и оледенения.

Сотрудниками ИВЭП СО РАН, АлтГУ (г. Барнаул) и ИЭЧ СО РАН (г. Кемерово) в течение полевых сезонов 2009 – 2011 гг. выполнялась топографическая съемка ледников Томич (Катунский хребет, бассейн р. Мульта), Водопадный и Левый Тете (Северо-Чуйский хребет, бассейн р. Актру, массив Купол). Основная цель работы: проследить динамику морфометрических параметров ледников с использованием данных топографических съемок прошлых лет.

Методика наблюдений за колебаниями ледников

Наиболее простой и распространенный способ наблюдений за колебаниями ледников – маркировка их концов. Однако более полную картину дают топогеодезические работы на ледниках, поскольку они позволяют проследить колебания их площади, высоты поверхности и объема льда.

С начала 70-х до середины 90-х гг. топографическая съемка ледников на Алтае производилась Р.М. Мухаметовым. Первая топографическая съемка была выполнена им в 1973 году на леднике Томич. Основа топоплана составлена по материалам теодолитной съемки (теодолит Т-30). Сгущение

горизонталей проводилось на основании фототеодолитной съемки (фототеодолит Karl Zeiss, Jena). Обработка фототеодолитной съемки производилась в МГУ (под руководством Ю.Ф. Книжникова). Карта ледника Томич, в масштабе 1:10 000, приводится в монографии «Горноледниковые бассейны Алтая» [5]. Повторные съемки ледника Томич проводились Р.М. Мухаметовым в 1983 и 1995 гг. Аналогичным образом была выполнена съемка 27 ледников Алтая с интервалом в 5-10 лет [1].

В 2009-2011 гг. для топографической съемки ледниковой поверхности использовались геодезические GPS Leica SR20 и Epoch 10. Это одночастотные (L1) геодезические системы для выполнения профессиональных топографических измерений, с сантиметровой точностью, в режимах «STATIC» и «KINEMATIC» с постобработкой. Такие приемники можно использовать в качестве устройства для сбора данных GIS и как опорную GPS станцию. При съемке поверхности ледника используется два приемника: один в качестве базовой станции производит съемку на опорной точке в режиме «STATIC», с помощью второго, работающего в режиме «KINEMATIC», измеряются координаты точек на поверхности ледника.

Поскольку топографическая съемка ледников из-за их труднодоступности требует значительных материальных и физических затрат, работа с геодезическими GPS позволяет существенно ускорить и упростить процесс съемки по сравнению с теодолитом или тахеометром. При этом в условиях высокогорий работа с подобными приборами имеет определенные особенности.

Во-первых, для съемки необходим устойчивый сигнал 4 и более спутников, поэтому предпочтительнее всего использовать GPS на открытых площадках и в ясную погоду. В условиях сильнорасчлененного рельефа при запуске GPS поиск спутников занимает больше времени, инициализация прибора может составлять до 30-40 минут. В процессе работы сигнал спутников может пропадать, после чего необходима новая инициализация. Естественно, это сильно замедляет работу. В некоторых случаях (например, в глубоком ущелье), GPS может не «поймать» сигнал достаточного количества спутников. Так, например, при попытке съемки языка ледника Малый Актру в пасмурную погоду, GPS Leica SR 20 смог принять сигнал только двух спутников, что не позволило выполнить измерения. При работе на ледниках массива Купол и в каре ледника Томич подобных проблем не возникало.

Во-вторых, в условиях труднодоступных высокогорий серьезную проблему представляет необходимость подзарядки или замены элементов питания. На большой абсолютной высоте в условиях пониженных температур время работы аккумуляторов сокращается на 20-30%.

В-третьих, съемка производится только на той части ледника, которая доступна для относительно безопасного передвижения. Так, на леднике Томич во время съемки 2009-2010 гг. точками было охвачено около 70% ледниковой поверхности, на леднике Водопадном – практически 100% поверхности, на леднике Левый Тете - около 30-40 %. На рис. 1 показаны точки съемки ледника Томич 2009-2010 гг.

Постобработка результатов измерений производится с помощью поставляемого вместе с GPS программного обеспечения Geo Office, которое позволяет впоследствии экспортировать данные в системы GIS и CAD.

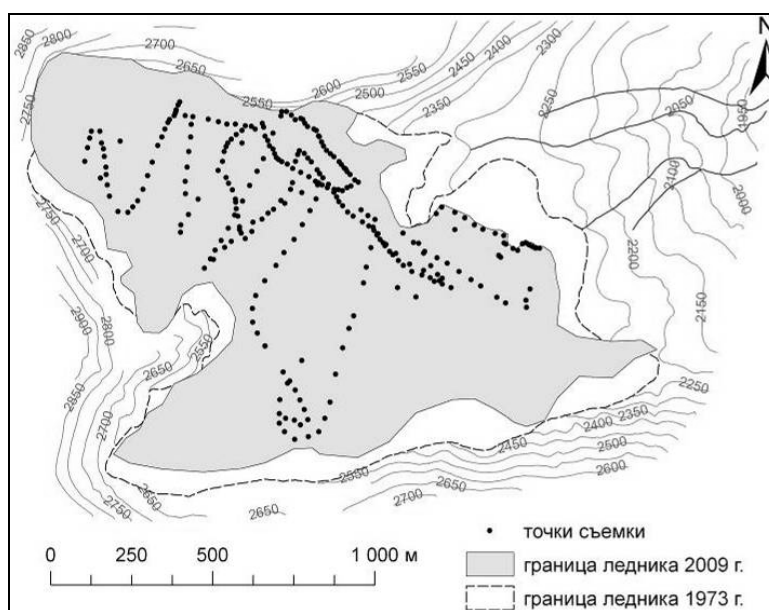


Рис. 1. Точки топографической съемки ледника Томич.

Результаты работ: климатические изменения и колебания ледника

Сопоставляя топографические съемки прошлых лет с полученными материалами, можно определить изменение высоты поверхности ледников. В качестве примера приведем результаты работ на леднике Томич. На рис. 2 представлено изменение поверхности ледника Томич с 1973 по 2010 гг. За период наблюдений произошло значительное сокращение его толщины (до 50 м и более на языке), в среднем она уменьшилась на 18,9 м.

Наиболее значительное влияние на ледники оказывает изменение теплоприхода, самым простым и достоверным показателем которого является среднелетняя температура [1]. На рис. 3 представлено изменение объема ледника Томич с 1973 по 2010 гг. и кривая температур периода абляции (июнь-август) по станции Каратюрек (северный склон Катунского хребта, абсолютная высота 2605 м, наблюдения с 1939 г.). Информация о толщине и объеме ледника Томич получена по материалам радиолокационной съемки, выполненной в 2000 г. гляциологическим отрядом ТГУ [4].

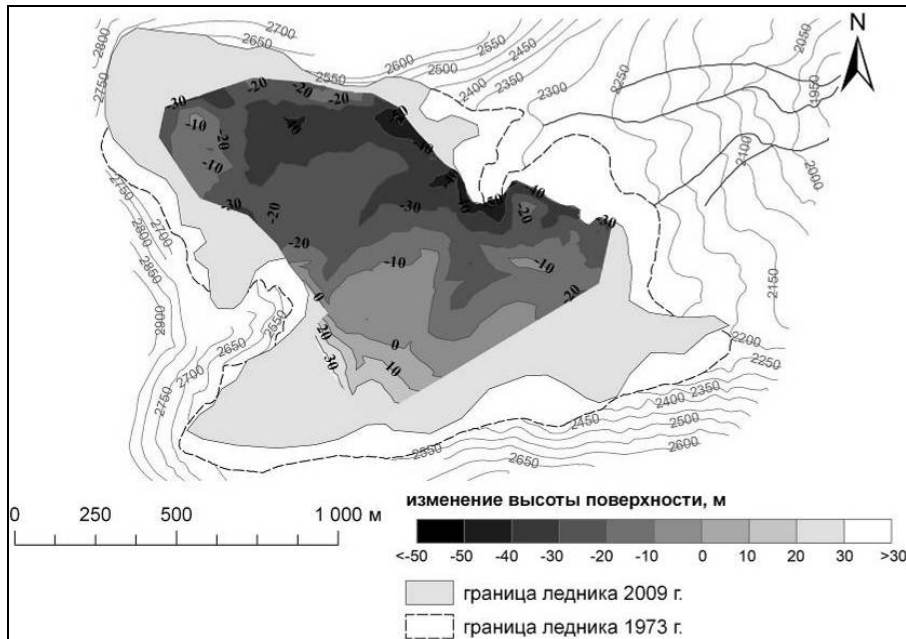


Рис. 2. Изменение поверхности ледника Томич с 1973 по 2010 г.



Рис. 3. Изменение средней летней температуры по станции Каратюрек и динамика объема ледника Томич.

Динамика объема ледника довольно хорошо согласуется с температурной кривой. В начале 80-90 гг., когда летние температуры были ниже средних (рисунок 3), объем ледника оставался неизменным, даже незначительно увеличился, при этом язык ледника продолжал отступать. Общая потеря запасов льда за период с 1973 по 2010 г. составила приблизительно 30 млн. м³, то есть с 1973 г. объем ледника Томич сократился на 45%. Площадь ледника за этот период сократилась на 19%. Таким образом, сокращение

запасов льда произошло в бо́льшей степени за счет уменьшения толщины ледника. Причем интересен тот факт, что наряду с интенсивным уменьшением толщины ледника на языке, на отдельных участках фирнового бассейна происходит накопление вещества (см. рис. 2).

Все это еще раз свидетельствует о том, что инструментальные наблюдения за изменением высоты ледниковой поверхности позволяют более детально проследить процесс сокращения ледника.

Систематическое выполнение съемки поверхности ледников поможет исследовать реакцию отдельных ледников и их групп на климатические изменения, что позволит впоследствии исследовать и прогнозировать изменение речного стока и запасов воды в горно-ледниковых бассейнах.

Работа выполнена в рамках проекта № VII.63.3.2. «Ледники как индикаторы климатических изменений под влиянием вулканической деятельности».

Литература

1. Галахов В.П., Мухаметов Р.М. Ледники Алтая. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1999. 136 с.
2. Галахов В.П., Нарожный Ю.К., Никитин С.А. и др. Ледники Актру (Алтай). Л.: Гидрометеоздат, 1987. 119 с.
3. Нарожный Ю.К., Никитин С.А. Современное оледенение Алтая на рубеже XXI века // Материалы гляциологических исследований. 2003. Вып. 95. С. 93-101.
4. Никитин С.А., Веснин А.В., Осипов А.В., Игловская Н.В. Распределение объемов льда в западной части Катунского хребта по данным радиолокационного зондирования // Вестник ТГУ. 2001. № 274. С. 34-39.
5. Ревякин В.С., Галахов В.П., Голещихин В.П. Горноледниковые бассейны Алтая. Томск: Изд-во ТГУ, 1979. 310 с.
6. Хеберли В., Хельцле М. Опыт использования кадастровых данных для оценки основных гляциологических характеристик и воздействия региональных изменений климата на горные ледники (на примере Альп) // Материалы гляциологических исследований. 1997. Вып. 82. С. 116-124.
7. Hagedorn H. Eiszeit, Klimaänderung und Menschheit // Akademie aktuell. Dezember, 2004. S. 8-13.

Методы и средства организации параллельных и распределенных вычислений на основе парадигмы модульного программирования

И.В. Бычков, Г.А. Опарин, А.П. Новопашин, И.А. Сидоров, С.А. Горский

Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

1. Введение

Происходящее в последнее десятилетие широкомасштабное внедрение в практику расчетных работ параллельной вычислительной техники (в особенности кластерных архитектур) способствует возрождению интереса к пакетной проблематике, что влечет, в свою очередь, необходимость реконструкции старых и создания новых методов и средств организации параллельных и распределенных вычислений с использованием пакетов прикладных программ (ППП).

В качестве самостоятельного научного направления пакетная проблематика сложилась в 70-80-х годах прошлого столетия. Если первые ППП представляли собой простые тематические подборки программ для решения отдельных задач в той или иной предметной области, то современные ППП являются сложными программными комплексами, включающими: прикладное программное обеспечение (функциональное наполнение) пакета в виде библиотеки прикладных программных модулей; системное программное обеспечение для организации решения пользовательских задач с использованием функционального наполнения, включающее средства автоматизации планирования вычислений (в том числе параллельных и распределенных); специализированные языковые средства описания предметной области и постановки пользовательских задач.

Изначальная ориентация и настройка на широкий класс задач предметной области, в которой работает прикладной специалист, является одной из ключевых особенностей ППП. Сочетание в одном пакете множества разнообразных моделей и алгоритмов достигается путем использования принципа модульной организации функционального наполнения пакета. Входящий в состав ППП модуль представляется, как правило, в виде автономной программной единицы, написанной на традиционном языке программирования и обеспечивающей решение некоторой подзадачи. Предполагается, что взаимодействие модулей осуществляется только на уровне их входных и выходных параметров. Использование принципа модульности позволяет заменить написание программы (в традиционном понимании) ее конструированием из готовых программных блоков крупного размера. Расширение класса задач, решаемых пакетом, может достигаться за счет подключения к ППП вновь создаваемых модулей.

В настоящее время серьезное внимание уделяется проблеме создания, так называемых, интеллектуальных ППП, позволяющих конечному пользователю формулировать свою задачу в содержательных терминах без указания алгоритма ее решения. Синтез схемы решения и сборка целевой программы производятся автоматически, при этом детали вычислений остаются скрытыми от пользователя. Такой способ организации вычислений, берущий свое начало в работах Э.Х. Тыугу [1], С.С. Лаврова [2], Г.А. Опарина [3] и других, известен как концептуальное (структурное, сборочное) программирование. Он предполагает наличие вычислительной модели (схемы) предметной области, позволяющей описывать вычислительные возможности ППП для решения задач определенного класса. Такую вычислительную модель можно определить как совокупность значимых величин (параметров) предметной области и функциональных отношений между ними. Таким образом, вычислительная модель, по сути, определяет правила применения и сочетания модулей в процессе решения задачи и позволяет автоматически осуществлять планирование вычислений по непроцедурной постановке задачи вида: «по заданным значениям параметров x_1, x_2, \dots, x_k вычислить значения параметров y_1, y_2, \dots, y_r ».

Большое разнообразие разработанного прикладного программного обеспечения требует создания универсальных (изначально не привязанных к конкретной предметной области) инструментальных средств, позволяющих с наименьшими трудозатратами объединять имеющийся программный код в рамках одного ППП. Кроме этого, такой инструментарий должен обеспечивать корректность и отказоустойчивость вычислений в рамках ППП, эффективность использования функционального наполнения пакета, высокий уровень интеллектуализации с учетом современных требований, включая автоматизацию процессов выявления внутреннего параллелизма вычислительной модели, синтеза параллельных планов решения задач и генерации на основе этих планов параллельных прикладных программ для различных вычислительных архитектур. В настоящее время наблюдается дефицит инструментальных средств, обладающих перечисленными характеристиками.

Следующие разделы статьи посвящены описанию базовой вычислительной модели планирования параллельных и распределенных вычислений и использующих эту модель инструментальных средств разработки параллельных и распределенных пакетов прикладных программ. Распределенные вычислительные системы, организованные с помощью рассматриваемых в работе инструментальных средств [4], являются частным случаем GRID-систем.

2. Базовая модель планирования вычислений

В качестве базы знаний планировщика используется структура

$$KB = (F, Z, T, Y, In, Out, Com),$$

где: $F = \{F_1, \dots, F_n\}$ – множество имен программных модулей, реализующих операции предметной области; $Z = \{Z_1, \dots, Z_m\}$ – множество имен параметров (значимых величин) предметной области, являющихся входными или выходными параметрами модулей из F ; с каждым модулем F_i связано два множества параметров $A_i, B_i \subset Z$, называемых соответственно входом и выходом; $T = \{T_1, \dots, T_r\}$ – множество типов параметров; $Y = \{Y_1, \dots, Y_p\}$ – множество узлов вычислительной системы (ВС); $In \subset F \times Z$, $Out \subset F \times Z$ – отношения, отражающие взаимосвязь модулей с данными соответственно по входу и выходу; $Com \subset F \times Y$ – отношение, определяющее статические связи между программными модулями и узлами ВС.

Предполагается, что база знаний KB обладает высоким уровнем внутреннего параллелизма и является избыточной в том смысле, что для решения задачи вычисления требуемого набора целевых параметров B_0 по заданному множеству параметров - исходных данных A_0 используется только часть модулей из F , и/или эта задача имеет несколько альтернативных планов решения.

Отношения In , Out и Com представлены в виде трех булевых матриц A , B и C размерности $n \times m$, $n \times m$ и $n \times p$ соответственно. Элементы матриц формируются следующим образом: $a_{ij}=1$ ($b_{ij}=1$), если параметр Z_j является входным (выходным) для модуля F_i ; $c_{ij}=1$, если модуль F_i установлен в узле Y_j . Строки и столбцы матриц A , B и C являются двоичным представлением соответствующих подмножеств множеств F , Z и Y , связанных отношениями In , Out и Com .

План вычислений представляется в виде матрицы X $k \times n$ булевых переменных x_{ij} . Значение x_{ij} равно единице означает, что программный модуль F_j выполняется на t -м шаге плана X , где $t \in N = \{1, 2, \dots\}$ играет роль дискретного времени. Общая длина плана равна k , его строка задает множество параллельно исполняемых модулей, а столбцы соответствуют множеству модулей F .

Информационно-логические связи между параметрами и модулями, входящими в план, можно представить в виде двудольного ориентированного графа, включающего два непересекающихся множества вершин (рис. 1): множество вершин-параметров и множество вершин-модулей.

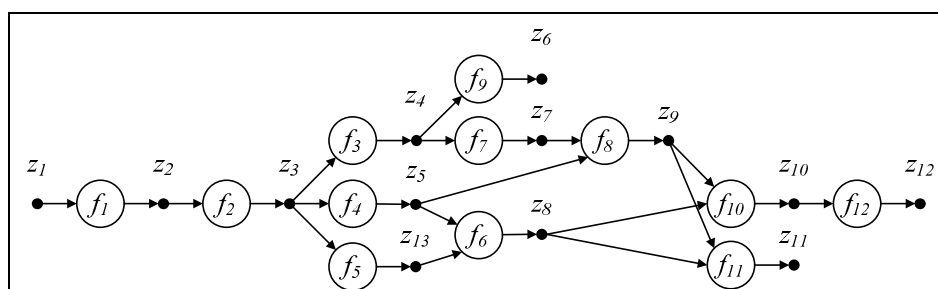


Рис. 1. Пример двудольного ориентированного графа, отражающего информационно-логические зависимости между параметрами и модулями ППП.

К значениям элементов матрицы X предъявляются ограничения, которые записываются в форме булевых уравнений и представляют собой требования к искомому параллельному плану, синтезируемому в процессе решения системы таких уравнений. К числу обязательных требований относятся следующие:

- 1) допустимость (модули в плане должны быть упорядочены таким образом, чтобы каждый из них к моменту своего запуска был обеспечен необходимыми входными данными);
- 2) неповторность (каждый модуль может включаться в план не более одного раза);
- 3) неизбыточность (исключение любого модуля из плана приводит к недопустимому плану);
- 4) оптимальность (длина плана должна быть равна заданной величине k).

Кроме обязательных требований, при необходимости могут быть сформулированы и добавлены в общую систему ограничений дополнительные условия, позволяющие при построении плана учитывать временные задержки, связанные с исполнением программных модулей, ресурсные ограничения ВС (число узлов или процессоров), привязку модулей к узлам ВС, требование синхронности запуска модулей и другие ограничения. В [5] для большинства из перечисленных ограничений получены формулировки в виде булевых уравнений.

Преимущества такого подхода к планированию крупноблочных вычислений, при котором условия задачи формулируются в виде системы булевых уравнений (ограничений), а искомый план исполнения модулей является ее решением, состоит в том, что он позволяет, во-первых, получать параллельные планы требуемой длины, во-вторых, учитывать разнообразные ограничения, предъявляемые к плану, и, наконец, в-третьих, использовать существующие эффективные решатели булевых уравнений (или SAT-

решатели), которые в ряде случаев обгоняют по быстродействию специализированные алгоритмы планирования.

С практической точки зрения можно выделить два типовых подхода к организации функционального наполнения пакета и распределения модулей по узлам ВС:

- 1) Все вычислительные модули содержатся в единой библиотеке, установленной на рабочей станции разработчика пакета. По непроцедурной постановке задачи производится автоматическое планирование параллельной схемы вычислений (с соблюдением установленных ограничений). В соответствии с полученной схемой осуществляется синтез целевой параллельной программы, ее компиляция и запуск на заданном числе узлов однородной ВС.
- 2) Вычислительные модули размещаются в узлах ВС, отличающихся программно-аппаратными характеристиками, что накладывает дополнительные требования к организации функционального наполнения ППП. При этом часть модулей может быть неотчуждаема от владельцев узлов, допускается множественность установки модулей в узлах ВС. Постановка задач осуществляется в процедурном виде, а исполнение построенных схем решения выполняется в режиме интерпретации.

Далее в статье рассматриваются инструментальные средства, реализующие описанные подходы к организации функционального наполнения параллельных и распределенных пакетов прикладных программ.

3. Инструментальный комплекс ORLANDO

Данный инструментарий ориентирован на создание ППП для однородных UNIX-кластеров с возможностью автоматической генерации параллельных программ для решения вычислительных задач в виде композиции готовых функциональных блоков. На рис. 2 представлена архитектура инструментального комплекса (ИК) ORLANDO, которая включает следующие основные компоненты: многооконный текстовый редактор, синтаксический анализатор, планировщик, генератор, подсистему компиляции, подсистему запуска, базу расчетных данных.

Высокоуровневый язык ORLANDO [6] предоставляет средства для описания объектов предметной области (параметров и операций), отношений между ними и обеспечивает на основе этих описаний постановку вычислительных задач в непроцедурном виде. Конструкции языка носят исключительно описательный (декларативный) характер и не предполагают указания порядка исполнения модулей, участвующих в решении задачи. Все информационно-логические связи между модулями выявляются на этапе трансляции описания предметной области.

Текстовый редактор предоставляет пользователю набор функций, необходимых для быстрого и удобного формирования описания предметной области и постановок задач с использованием языковых конструкций ORLANDO, а также функций для взаимодействия с другими компонентами инструментального комплекса – транслятором, подсистемами компиляции и запуска, базой расчетных данных.

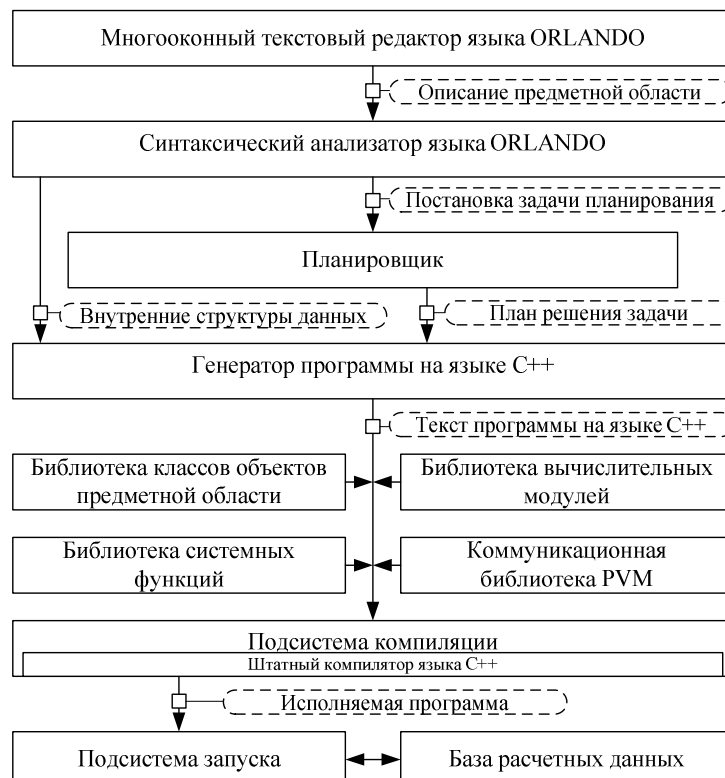


Рис. 2. Архитектура ИК ORLANDO.

Синтаксический анализатор осуществляет разбор описания предметной области на языке ORLANDO, проверку корректности и целостности такого описания и его перевод во внутреннее представление системы планирования.

Планировщик, реализованный в соответствии с рассмотренной выше базовой моделью планирования, строит по непроцедурной постановке задачи с учетом имеющихся ограничений параллельный (в общем случае) план ее решения в виде частично-упорядоченного набора имен вычислительных модулей из функционального наполнения пакета.

Полученная таким образом абстрактная программа с использованием генератора преобразуется в программу на языке C++, состоящую из двух частей – управляющей и вычислительной. Управляющая часть программы оформляется в виде управляющего (головного) модуля, отвечающего за исполнение построенного параллельного плана решения задачи. Управляющий модуль реализует следующие функции: ввод (вывод) значений входных (выходных) параметров, хранение значений параметров в процессе вычислений, хранение информации о ходе вычислений, запуск отдельных вычислительных модулей на исполнение с использованием возможностей коммуникационной библиотеки PVM [7]. Вычислительная часть программы формируется из оберточных модулей. Для каждого вычислительного модуля, входящего в план решения задачи, создаются специальные программы-обертки, отвечающие за прием значений входных параметров от управляющего модуля, вызов соответствующей подпрограммы из функционального наполнения ППП, отсылку полученных значений выходных параметров управляющему модулю.

Подсистема компиляции параллельных программ выполняет следующие основные функции: обеспечивает подключение пользователя к вычислительному кластеру, копирует исходные файлы программ на языке C++ в пользовательский директорий на управляющем узле кластера, производит компиляцию главной программы и вспомогательных модулей с использованием штатных средств компилятора языка C++ (в случае возникновения ошибок выводятся соответствующие сообщения). Для компиляции используются следующие библиотеки: библиотека классов языка C++ для программной реализации объектов предметной области; библиотека системных функций управляющего модуля; библиотека вычислительных модулей, представляющая собой функциональное наполнение ППП; коммуникационная библиотека PVM.

Подсистема запуска параллельных программ копирует файлы с наборами исходных данных, осуществляет запуск программы на целевом кластере, производит мониторинг работы программы пользователя, по завершении вычислений копирует файлы, содержащие значения целевых параметров в базу расчетных данных. Главной особенностью такой базы является возможность хранения результатов по вариантам вычислительных экспериментов.

Порядок работы ИК ORLANDO предполагает, что на начальном этапе пользователь формирует описание предметной области, используя выразительные средства языка ORLANDO. Далее он приступает к решению задачи, формулируя ее в непроцедурной форме “исходные параметры => цель расчета” в виде указания планировщику. Построенный планировщиком параллельный план решения задачи на этапе трансляции преобразуется в параллельную программу на языке C++, после чего готовая параллельная программа перемещается на целевой вычислительный кластер, где компилируется штатными средствами. С помощью подсистемы запуска из базы расчетных данных на кластер копируются необходимые исходные данные, и осуществляется запуск программы на счет.

4. Инструментальный комплекс DISCOMP

Инструментальный комплекс DISCOMP предназначен для поддержки основных этапов разработки и применения распределенных пакетов прикладных программ (РППП), ориентированных на работу в гетерогенной (многоплатформенной) распределенной вычислительной среде (РВС), которая может включать вычислительные кластеры различных конфигураций. Вычислительные модули, составляющие функциональное наполнение РППП, представляют собой исполняемые программы, которые могут быть реализованы на различных языках программирования (например, C, Fortran, Pascal и др.) и быть платформо-зависимыми. Допускается включение в состав функционального наполнения РППП нетиражируемых программных комплексов, размещенных в строго определенных узлах РВС, а также унаследованного программного обеспечения, переставшего соответствовать современным требованиям, но до сих пор эксплуатируемого в связи с трудоемкостью его модификации или замены. Удаленный запуск модулей, обмен данными между модулями через файлы и мониторинг узлов РВС реализуются средствами системной части РППП.

Постановка содержательной задачи для структуры KB задается пользователем пакета в процедурном виде и в общем случае формулируется следующим образом: “зная KB выполнить Q ”, где Q представляет собой частично упорядоченную последовательность модулей $Q_i \subset F$. В процессе установления частичного порядка множество Q разбивается на k непустых подмножеств. Упорядочение подмножеств осуществляется по степени готовности модулей к исполнению. В рамках каждого подмножества входящие в него модули могут выполняться независимо друг от друга в любой последовательности или параллельно.

Под схемой решения задачи (CP3) в ИК DISCOMP понимается модель крупноблочной программы, отражающая информационно-логическую структуру вычислений в терминах предметной области. CP3 строится автоматически в параллельно-ярусной форме из элементов следующих множеств: множества параметров Z ; множества модулей F ; множества событий E , возникающих в процессе выполнения CP3; множества операций H , предназначенных для управления процессом выполнения CP3; множества специальных операторов $O = \{START, STOP, READ \langle \text{список параметров} \rangle, WRITE \langle \text{список параметров} \rangle, CALL \langle \text{имя модуля} \rangle, FORK, JOIN, TERMINATE \langle \text{список модулей} \rangle\}$.

Построение CP3 осуществляется в два этапа:

- I. Разработчик РППП формирует ярусы CP3, размещает на этих ярусах модули из F и определяет события из E , при возникновении которых необходимо выполнить те или иные управляющие функции из H .
- II. Транслятор постановки задачи на основе информационно-логических связей между параметрами и модулями структуры KB определяет множества входных параметров A_0 и целевых параметров B_0 CP3, выполняет проверку необходимых ограничений (допустимость, неповторность, избыточность) и дополняет постановку задачи специальными операторами из O .

Выполнение CP3 в режиме интерпретации представляет собой процесс параллельно-последовательного выполнения ее операторов в соответствии с порядком их вхождения в управляющий граф (рис. 3,а), вершинами которого являются операторы вызова модулей (или их экземпляров) из F , а также специальные операторы. Передача данных (значений параметров) между модулями выполняется в соответствии с информационным графом (рис. 3,б).

К основным составляющим программно-аппаратной архитектуры инструментального комплекса DISCOMP относятся: система управления РВС, набор вычислительных клиентов РВС, система хранения данных и средства доступа пользователей к РППП. Схема взаимодействия основных компонентов представлена на рис. 4.

Система управления РВС (серверная часть ИК DISCOMP) поддерживает взаимодействие с подсистемами хранения данных и доступа пользователей к пакету, а также обеспечивает централизованное управление узлами РВС. Серверная часть ИК DISCOMP включает системное ядро, менеджеры вычислительных процессов и ресурсов, диспетчер очереди задач, подсистему журнализации и исполнительную подсистему.

Вычислительный клиент реализует процесс выполнения модуля в узле РВС и осуществляет следующие функции: организацию соответствующей среды для работы модуля (создание временных директорий, файлов входных и выходных параметров модулей, задание значений переменных окружения, перенаправление ввода/вывода и т.д.); получение значений входных параметров модуля из управляющего узла; запуск модуля; контроль процесса его выполнения; отсылку значений выходных параметров в управляющий узел после завершения работы модуля.

Система хранения данных используется для структурированного размещения описаний предметной области, постановок задач в формате XML и расчетных данных в виде файлов, а также для предоставления доступа к ним из различных подсистем ИК DISCOMP. Синхронизация процессов чтения/записи данных осуществляется посредством файловых блокировок.

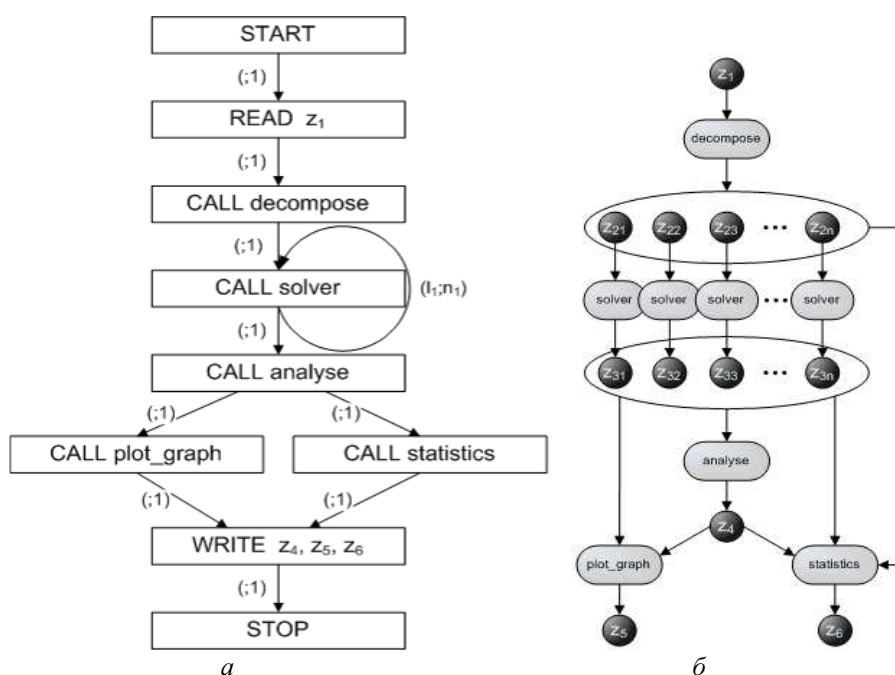


Рис. 3. Примеры управляющего (а) и информационного (б) графов CP3.

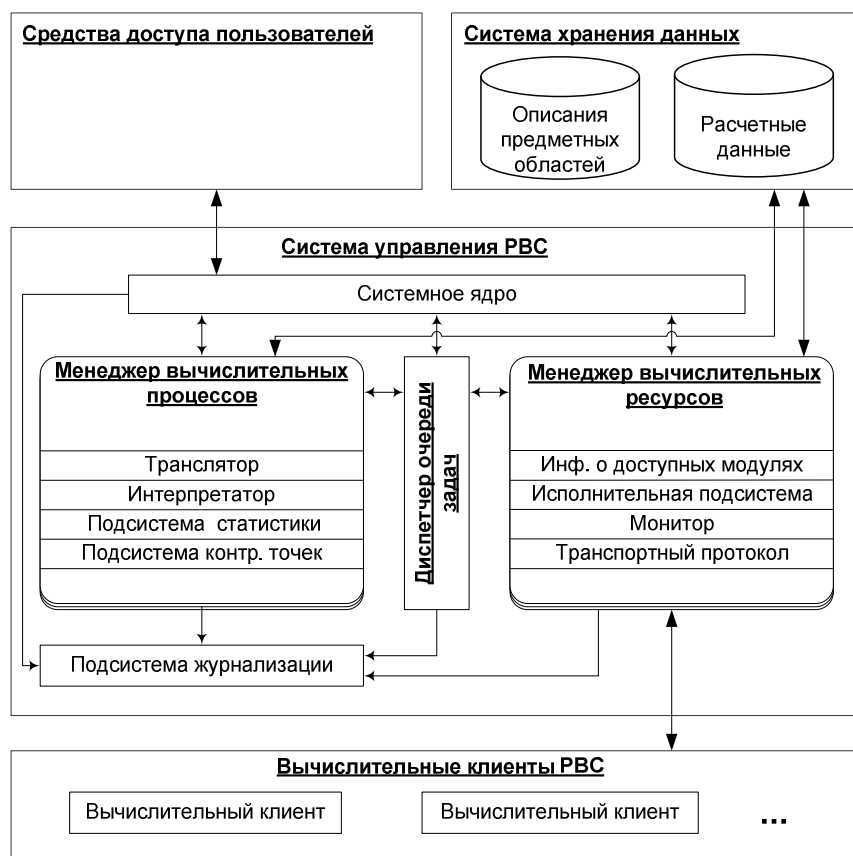


Рис. 4. Схема взаимодействия основных компонентов ИК DISCOMP.

Средства доступа пользователей к РППП обеспечивают взаимодействие пользователя с пакетом, управление вычислительными процессами, ввод данных, получение результатов вычислений. ИК DISCOMP предоставляет два способа взаимодействия пользователя с РППП: с помощью набора утилит командной строки и посредством интерактивного пользовательского web-интерфейса.

Связь распределенных компонентов ИК DISCOMP между собой реализована на основе специально разработанного протокола сетевого взаимодействия, поддерживающего обмен сообщениями, удаленный вызов процедур и передачу больших объемов бинарных данных. Протокол сетевого взаимодействия обеспечивает высокопроизводительный обмен данными между компонентами ИК DISCOMP за счет установки между ними непрерывного соединения по TCP-каналу, использования многопоточного режима работы серверной части ИК DISCOMP и минимизации объемов управляющих данных в теле передаваемого сообщения.

Эффективность решения задач в РППП обеспечивается следующими особенностями работы ИК DISCOMP: возможностью максимально эффективного использования разнородных ресурсов РВС; поддержкой высокопроизводительного взаимодействия между распределенными компонентами ИК DISCOMP; гибкой диспетчеризацией очередей задач; наличием средств оптимизации объемов данных, передаваемых между модулями в процессе решения задач в РВС; возможностью динамического управления процессами решения задач. Более подробно механизмы построения эффективных вычислительных процессов для ИК DISCOMP рассмотрены в [8].

5. Вычислительный эксперимент

Представленные в данной работе инструментальные средства получили широкое применение в Суперкомпьютерном центре коллективного пользования ИДСТУ СО РАН при решении прикладных задач из различных предметных областей: исследование биоресурсов озера Байкал; моделирование логистических складских систем; решение задач оптимального управления, решение систем булевых уравнений и других.

С помощью ИК ORLANDO был разработан пакет ГРАДИЕНТ, предназначенный для поиска глобального минимума многоэкстремальной функции высокой размерности с помощью метода мултистарта. Пакет позволяет варьировать управляющие параметры, влияющие на точность нахождения глобального минимума и время решения задачи. Возможности пакета испытывались на ряде многоэкстремальных функций (Катковника, Растригина, Griewank), относящихся к классу сложных задач оптимизации. Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1. Время решения задачи поиска глобального минимума.

Функция	Время решения задачи на 2 ядрах	Время решения задачи на 8 ядрах	Время решения задачи на 32 ядрах
Катковника	8 ч	115 – 125 мин	30 – 35 мин
Растригина	7 ч	100 – 115 мин	30 – 35 мин
Griewank	10 ч	150 – 170 мин	40 – 45 мин

Таблица 2. Время решения SAT-задач.

SAT-задача криптоанализа	Время решения задачи на 1 ядре	Время решения задачи в PBC из 160 ядер	Время решения задачи в PBC из 160 ядер с устранением вычислительной избыточности
Генератор Гиффорда	14 – 30 ч	1 – 2 ч	30 – 60 мин
Суммирующий генератор	20 мин – 2 ч	10 – 30 мин	2 – 6 мин
Пороговый генератор	≥ 3 суток	30 – 120 мин	6 – 10 мин

Одним из показательных примеров применения ИК DISCOMP являются задачи обращения дискретных функций. Разработанный средствами ИК DISCOMP пакет D-SAT [9] реализует технологию крупноблочного распараллеливания SAT-задач. С применением этого пакета был успешно проведен распределенный криптоанализ генераторов двоичных шифров: Гиффорда, суммирующего и порогового. Вычислительные эксперименты проводились в PBC, состоящей из 20 двухпроцессорных узлов (всего 160 ядер). В табл. 2 приведены сравнительные результаты криптоанализа, выполненного на одном ядре и в PBC как с применением механизмов устранения вычислительной избыточности, так и без них.

6. Заключение

Представленный в данной работе подход к организации параллельных и распределенных пакетов прикладных программ допускает естественное развитие и обобщение для базовых технологий параллельных и распределенных вычислений и новых классов фундаментальных и прикладных исследовательских задач. Архитектура и принципы работы рассмотренных инструментальных средств обеспечивают широкий спектр функциональных возможностей по разработке и применению таких пакетов для вычислительных систем различного типа.

Литература

1. Тыугу Э.Х., Харф М.Я. Алгоритмы структурного синтеза программ // Программирование. 1980. № 4. С. 3-13.
2. Бабаев И.О., Лавров С.С., Нецветаева Г.А. и др. СПОРА – система программирования с автоматическим синтезом программ // Применение методов математической логики. Таллин: ИК АН ЭССР, 1983. С. 29-41.
3. Опарин Г.А. САТУРН – метасистема для построения пакетов прикладных программ // Разработка пакетов прикладных программ. Новосибирск, Наука, 1982. С. 130-160.
4. Бычков И.В., Опарин Г.А., Новопапин А.П. и др. Высокопроизводительные вычислительные ресурсы ИДСТУ СО РАН: Текущее состояние, возможности и перспективы развития // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15, № 3. С. 69-82.
5. Опарин Г.А., Новопапин А.П. Булевы модели синтеза параллельных планов решения вычислительных задач // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2008. Т. 6, Вып. 1. С. 53-59.
6. Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Горский С.А. Язык описания модели предметной области в пакетах прикладных программ // Программные продукты и системы. 2011. № 1.
7. Geist G., Beguelin A., Dongarra J. et al. PVM: Parallel Virtual Machine: A Users' Guide and Tutorial for Networked Parallel Computing // Cambridge: MIT Press, 1995. 273 p.
8. Опарин Г.А., Феоктистов А.Г., Сидоров И.А. Технология организации распределенных вычислений в инструментальном комплексе DISCOMP // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 2. С. 175-180.
9. Заикин О.С., Семенов А.А. Технология крупноблочного параллелизма в SAT-задачах // Проблемы управления. 2008. № 1. С. 43-50.

Мониторинг последствий изменения уровня озера Байкал дистанционными методами (на примере островной гряды Ярки)

А.К. Тулохонов, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев

Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ

Введение

После пуска в эксплуатацию Иркутской ГЭС в 1957 г. и в последующем всего каскада Ангарских гидроэлектростанций (Братской и Усть-Илимской) средний уровень оз. Байкал к 1959 г. был поднят более чем на 1,2 м по отношению к естественному состоянию (455,61 м, здесь и далее используется Тихоокеанская система высот), приведший к формированию нового гидрологического режима озера. Таким образом, в настоящее время уровень озера большей частью зависит не от природных факторов, а от гидроэнергетических параметров деятельности каскада Ангарских ГЭС. Следует отметить, что внутригодовые изменения уровня озера в его естественном режиме составляли 82 см, а после зарегулирования уже 94 см [1]. Подъем уровня озера отрицательно повлиял на продуктивность водной фауны и флоры, биоразнообразии околородных птиц и животных, а также привел к разрушению береговой линии. Конечным результатом строительства Иркутской ГЭС стало превращение оз. Байкал в искусственное водохранилище со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В период многоводных лет середины 90-х годов прошлого столетия наблюдались отметки, значительно превышающие уровень 457 м. Вследствие этого произошло массовое разрушение береговой линии низменного восточного побережья (прибрежных лесов, зон отдыха, размыв пляжей и береговых сооружений), подтопление и затопление сельскохозяйственных угодий и населенных пунктов. Был нанесен повсеместный экологический ущерб всему природно-биологическому комплексу озерной системы. Подсчитан экономический ущерб, нанесенный экономике Бурятии, есть и отрицательный опыт судебных тяжб с ОАО «Иркутскэнерго» [2]. С целью предотвращения подобных процессов Правительство Республики Бурятия по согласованию с Администрацией Иркутской области инициировало принятие в 2001 г. Постановления Правительства РФ № 234 «О предельных значениях уровня воды в оз. Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности». Данный подзаконный акт Федерального закона «Об охране оз. Байкал» регламентирует внутригодовое колебание уровня озера в пределах от 456 до 457 м.

Отдельно необходимо рассматривать реальную угрозу полного разрушения островов Ярки, отделяющих открытый Байкал от Верхнеангарского мелководья (рис. 1). Ярки – узкая песчаная островная система длиной до 17 км и шириной до 200 м. Песчаная коса острова находится неподалеку от пос. Нижнеангарск, материк от островов отделяют устья рек Кичера и Верхняя Ангара. Живописные пейзажи, теплая вода (здесь озеро прогревается до 24 °С) и протяженные песчаные пляжи делают Ярки одним из самых привлекательных мест отдыха в Северобайкалье.

При приближении уровня озера к отметке 457 м и соответствующей волновой деятельности в течение 3-5 суток группа островов Ярки просто исчезнет, а холодные байкальские воды уничтожат всю уникальную экосистему мелководий в дельтах Верхней Ангары и Кичеры и, в том числе, верхнеангарскую расу омуля, а длина оз. Байкал увеличится на 40-50 км к северу. Одновременно изменятся все параметры водной чаши озера и соответственно его уровеньный режим.

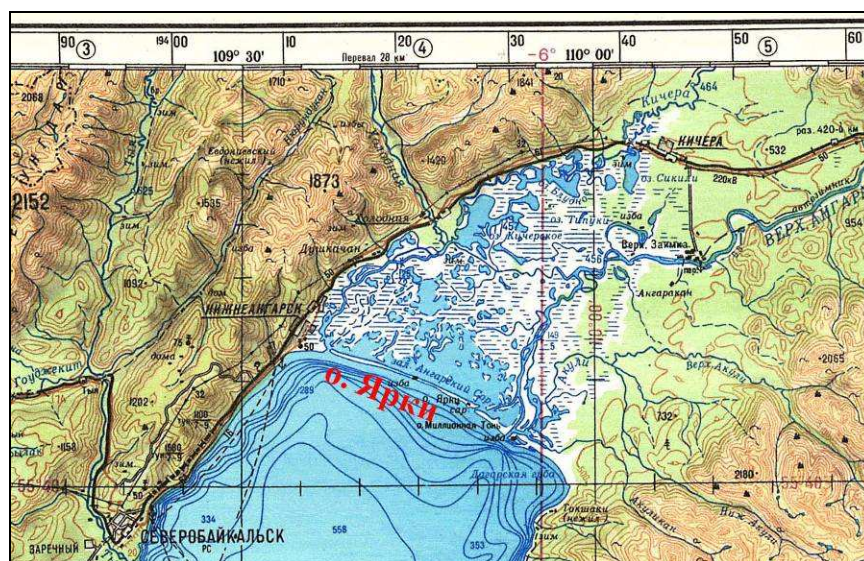


Рис. 1. Фрагмент топокарты М 1:500 000 (район Северного Байкала).

Волновая деятельность на всем протяжении берега от пос. Нижнеангарск до Дагары, где проходит устьевая часть р. Верхняя Ангара, уже не способствует поступлению с паводками влекомых и взвешенных песчаных фракций. Следовательно, объем поступившего наносного материала не может компенсировать происходящие размывы островов Ярки и тем более реконструировать их до прежнего состояния, существовавшего до повышения уровня озера до подпорной отметки Иркутского гидроузла. По расчетам О.Л. Рыбака, выполнившего в этом районе литодинамические исследования, среднемноголетняя скорость размыва островов составляет 0,8-1,0 м/год. Следовательно, полное уничтожение Ярков может произойти в ближайшие 30-40 лет.

Тематическая классификация природных сред

В работе на основе обработки данных дистанционного зондирования проведены исследования изменения состояния береговой линии островов Ярки. Регулярная космическая съемка представляет собой объективный, оперативно получаемый материал о состоянии земной поверхности и ее изменениях, а современные геоинформационные технологии обработки космоснимков обеспечивают точное покоординатное совмещение разновременных материалов для изучения динамики изменений, происходящих на поверхности Земли. Для оптимального дешифрирования и автоматического получения зонального деления территории выбран алгоритм автоматизированной классификации космического снимка.

Последовательность работ по обработке спутниковых изображений следующая:

- 1) загрузка ортотрансформированных изображений Landsat из Интернета;
- 2) преобразование снимков – синтез RGB-композигов, покоординатное выделение нужного фрагмента;
- 3) дешифрирование объектов (тематическая классификация с последующей генерализацией);
- 4) создание векторных слоев, их редактирование;
- 5) получение итоговой карты изменения берегов косы.

Обработка снимков проведена при помощи программного комплекса ENVI 4.7 и ENVI EX (www.itervis.com/ENVI), который включает наиболее полный набор функций для обработки данных дистанционного зондирования и их интеграции с ГИС. Созданные в ПО ENVI векторные слои впоследствии были обработаны в ГИС ArcView 3.3.

Картографирование островной системы Ярки выполнено по материалам разновременной мультиспектральной съемки. С геопортала Геологической службы США с помощью поисковой системы GloVis загружены четыре «летние» сцены платформы Landsat, т.к. летний период характеризуется стабильностью, продолжительностью и наилучшими условиями освещения:

- 1) от 3 июля 1994 г. (спектрорадиометр TM, облачность – 0 %, качество снимка – 9);
- 2) от 12 августа 2000 г. (спектрорадиометр ETM+, облачность – 17 %, но над районом исследований облачности нет, качество снимка – 9);
- 3) от 22 сентября 2006 г. (спектрорадиометр TM, облачность – 0 %, качество снимка – 7);
- 4) от 29 августа 2009 г. (спектрорадиометр TM, облачность – 0 %, качество снимка – 7).

В связи с особенностями прохождения спутников Landsat не удалось загрузить сцены за один и тот же период времени. Если же и есть сцены, близкие по дате, то мешают еще два фактора: облачность и плохое качество снимка, но все же постарались подобрать сцены, близкие по дате.

Одно из основных направлений использования многозональных снимков – синтез цветных изображений для визуального дешифрирования и последующей автоматизированной классификации. Известно, что разделение объектов и их оконтуривание целесообразно выполнять по снимкам с преднамеренно ложной цветопередачей. Для этого применен синтез с окрашиванием изображения, полученного в ближней инфракрасной (ИК) зоне спектра, красным цветом, в первой средней инфракрасной – зеленым, а в красной видимой зоне – синим, т.е. созданы псевдоцветные RGB-композиты с комбинацией каналов 4:5:3 (табл. 1). Эта комбинация каналов позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. С увеличением глубины вода выглядит темнее (вплоть до черного цвета), что обусловлено поглощением водой излучения ИК-диапазона.

Таблица 1. Спектральные диапазоны (каналы) радиометров Landsat TM и ETM+.

Номер канала	Разрешение, м	Зона спектра	Соответствующая длина волны, нм
1	30	синяя	450-515
2	30	зеленая	525-605
3	30	красная	630-690
4	30	ближняя ИК	760-900
5	30	средняя ИК – 1	1550-1750
6	60	дальняя ИК	10400-12500
7	30	средняя ИК – 2	2080-2350
8	15	панхроматическая	520-900

Из полученных RGB-композиций вырезаны одинаковые фрагменты размерами 21,5×11,7 км, в которые полностью входят Ярки.

Следующим этапом было получение областей интересов (ROIs – Region of Interests). Так как стоит задача отделения суши от водной поверхности, а вода достаточно однородна по спектральной яркости и при этом имеет самые низкие значения коэффициента отражения в сравнении с другими природными объектами, т.е. почти не перекрывается по яркости с ними, то в качестве областей интересов были выбраны полигональные объекты на воде и суше, которые впоследствии послужили в качестве обучающих выборок для проведения классификации с обучением.

Для выделения береговой линии использовалась контролируемая (иначе – с обучением) классификация методом прямоугольников. Данный метод применяют в случае, когда значения спектральной яркости разных объектов практически не перекрываются между собой, а классов объектов немного. Как следует из названия, при классификации в пространстве спектральных признаков выделяются области в форме прямоугольников, ограничивающих значения яркости объектов данного класса. Затем значения спектральных признаков в каждом пикселе сравниваются с граничными (минимальными и максимальными) в каждом классе. Если пиксел по своим значениям яркости попадает в один из выделенных диапазонов, то его относят к соответствующему классу. Если значения яркости пиксела не попали ни в один диапазон, его относят к неклассифицированным объектам. Если значения яркости попадают в несколько диапазонов, возможно несколько вариантов классификации объекта.

В качестве обучающих выборок были заданы два типа эталонных участков: водная поверхность и суша. Для каждого типа эталонов подсчитывались среднее значение яркости пиксела и стандартное отклонение яркости. Максимальное стандартное отклонение от среднего значения яркости класса «вода» не превышало значения 2, что связано с достаточно однородными характеристиками этого класса объектов. Недостатком выделения является частичное перекрытие яркостных характеристик песчаных отмелей с сушей, но при дальнейшей обработке эти наложения были удалены [3].

Также для отделения суши от водной поверхности использован алгоритм неконтролируемой классификации методом ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique – итерационная самоорганизующая методика анализа данных). Данный алгоритм целесообразно применять при отсутствии априорной информации об объекте съемки. Метод позволяет выделять контуры с неконтрастной по спектральной яркости структурой. Были выбраны оптимальные, на наш взгляд, параметры: количество классов – 2, максимальное число итераций – 20, порог сходимости (количество пикселей, которые меняют свою принадлежность к классу при переходе к следующей итерации) – 5 %, максимальное стандартное отклонение от среднего – 13, минимальное число пикселей для выделения класса – 3, максимальное стандартное отклонение внутри класса – 5, минимальное спектральное расстояние – 5 пикселей.

После проведения неконтролируемой классификации полученная карта классификации более объективно отражает близкие по значениям дешифровочных признаков группы объектов, чем при контролируемой классификации, т.к. кластеры определяются автоматически. Однако полученная карта классификации требует дальнейшего объединения или разбиения классов, поскольку одни и те же объекты могут попасть в разные кластеры (например, из-за условий освещения), а разные объекты – оказаться в одном кластере (из-за одинаковой яркости). В первом случае кластеры были объединены в один класс, а во втором для различения объектов привлечены дополнительные дешифровочные признаки.

Ареалы суши на изображениях, полученных в результате неконтролируемой и контролируемой классификации, оказались идентичными. Это связано с тем, что суша на снимках достаточно однородна по спектральной яркости, а граница воды и суши четко обнаруживается благодаря отражательным свойствам водной поверхности в используемой комбинации каналов Landsat.

Следующий шаг в дешифрировании участков «вода – суша (не вода)» – постклассификационная обработка методом «Анализ большинства». Цель метода – усилить воспроизведение распознанных объектов, подавить шум и другие случайные помехи, иными словами – генерализация изображения. В процессе обработки происходило изменение размера каждого пиксела изображения в зависимости от значений соседних пикселей в скользящем окне размерами 3 × 3 пиксела.

После проведения постклассификации проводился перевод полученных растровых изображений в векторную форму. Далее дешифрованные контуры водных участков и суши были отредактированы с целью получения только векторных слоев песчаной косы.

Снимок 2006 г. не удалось корректно обработать – классификация мешает плохое качество снимка (водная поверхность местами выглядит белесой и сливается с песчаными барами). В итоге получены 3 разновременных векторных слоя – за 1994, 2000 и 2009 гг. Налицо планомерное уменьшение площади песчаной косы Ярки в 2009 г. в сравнении с 2000 г. (на 0,2 км²) и 1994 г. (на 0,7 км²) (табл. 2, рис. 2-3).

Визуальный осмотр островов показал, что они продолжают разрушаться, причем берега преимущественно размывы со стороны озера. Основной причиной размыва Ярков является подъем уровня и волновые воздействия. Амплитуда колебаний уровня озера при его подъеме на 1 м и зарегулированном стоке в многолетнем разрезе увеличилась. Это привело к активизации абразионных процессов.

Таблица 2. Площади векторных слоев островной гряды Ярки.

№ п/п	Название файла	Год	Площадь, км ²
1	1994-4-5-3_isle.shp	1994	2,524
2	2000-4-5-3_isle.shp	2000	2,052
3	2009-4-5-3_isle.shp	2009	1,855

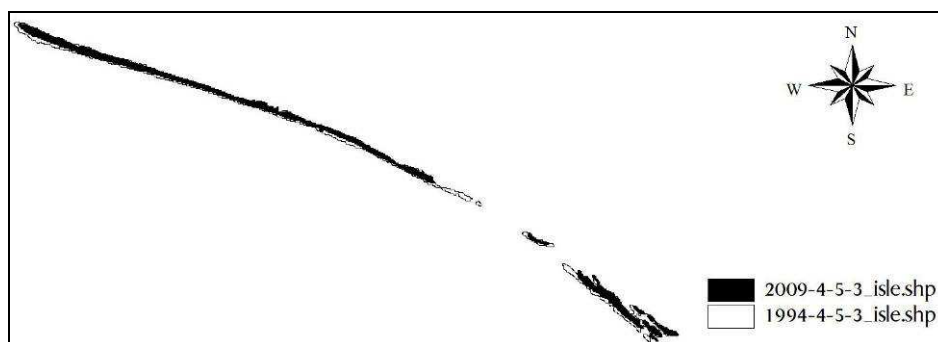


Рис. 2. Изменение островной гряды Ярки в сравнении векторных слоев 1994 и 2009 гг.



Рис. 3. Сравнение векторных слоев 2000 и 2009 гг.

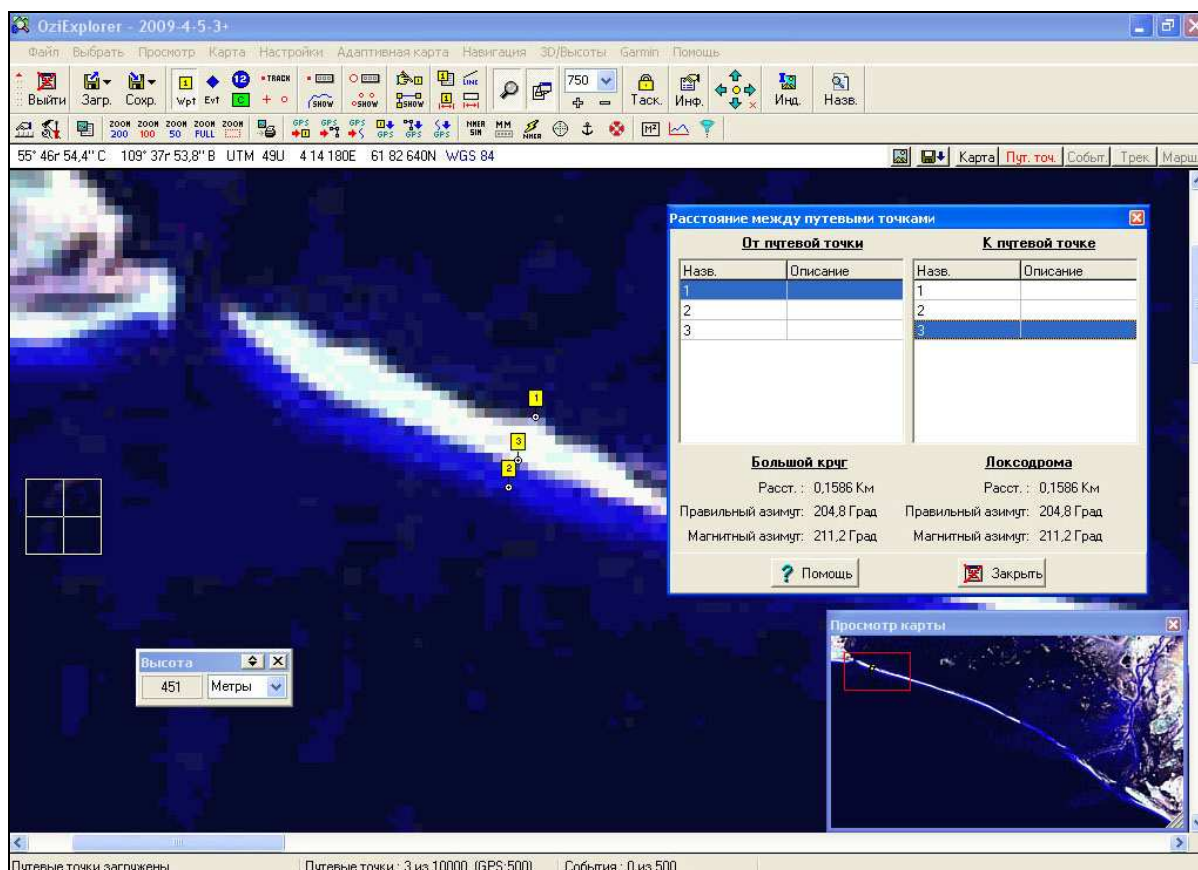


Рис. 4. Измерение ширины косы Ярки на снимке 2009 г. Песчаные отмели отображены голубым цветом. В окне предварительного просмотра (внизу справа) видна вся группа островов Ярки.

Для измерения ширины косы Ярки в программной среде по GPS-картографированию OziExplorer на снимке 1994 г. проставлены 2 путевые точки в самом широком месте левой части острова. Координаты точек 1 и 2 сохранены в wrt-файл путевых точек, расстояние между ними равно 243,7 м. Затем загружен снимок 2009 г., а на него путевые точки из сохраненного wrt-файла (рис. 4). Видно, что расстояние между краями косы уменьшилось. Добавлена еще одна путевая точка № 3 на границе косы 2009 г. Расстояние между точками 1 и 3 равно 158,6 м. Таким образом, ширина острова уменьшилась с 243,7 м в 1994 г. до 158,6 м в 2009 г., разница составляет 85,1 м.

Отметим, что катастрофическая активизация береговых процессов, наблюдаемая в настоящее время, спровоцирована именно техногенными причинами – подпором воды от гидроузла. Активное уничтожение отдыхающими растительности на Ярках усилило процесс развеивания дюн и выполаживания островов.

Заключение

В результате волновой деятельности оказались размывшими многие островки Ярков. Сгонно-нагонные явления, связанные с особенностями пространственных контуров озера и ветровым режимом, заведомо предполагают, что при южных ветрах уровень озера в осенний штормовой период в северной части водоема значительно превышает допустимые отметки, указанные в правительственном постановлении. Именно этим обстоятельством объясняется интенсивный размыв островной системы Ярки – наблюдаются значительные видоизменения песчаных островов, пересыпей, береговых валов и кос. Более того, даже при существующем уровне разрушения Ярков в ближайшем будущем может вызвать экспансию холодных байкальских вод далеко на север с катастрофическими последствиями для биоты устьев рек Кичера и Верхняя Ангара.

Эти обстоятельства дают основание, для сохранения экологически сбалансированной системы, ставить вопрос о регулировании уровня озера в пределах средних многолетних колебаний, существовавших на Байкале до строительства Иркутской ГЭС, т.е. внутригодовых колебаний в диапазоне 82 см. Безусловно, такая задача существенно осложняет работу гидроэнергетиков и выравнивает выработку электроэнергии по сезонам. Однако она реально выполнима при условии достаточного количества гидрологических постов и точных метеопрогнозов, позволяющих заранее накапливать или наоборот сбрасывать объемы воды в теле Иркутского водохранилища.

В условиях недостатка гидрометеорологической информации, необходимости увеличения продуктивности байкальских мелководий и развития индустрии туризма в особых экономических зонах необходимо более бережное отношение к береговым процессам. Решить эту задачу можно только при условии законодательного сокращения амплитуды минимальных и максимальных отметок уровня оз. Байкал, определяемых природными условиями до строительства каскада ГЭС. Кроме того, для получения оперативной информации по уровенному режиму и возможности его прогнозирования, а также для исключения влияния на уровень водоема по всей акватории различных природных явлений, необходимо рассмотреть вопрос об увеличении количества гидропостов на восточном и северном берегах оз. Байкал. В первую очередь, в местах, защищенных от активной ветровой деятельности, например, в Истомино или Лемасово, Чивыркуйском и Баргузинском заливах и гидропосты севернее островной гряды Ярки.

Литература

1. Атлас Байкала. М.: Федеральная служба геодезии и картографии России, 1993. 160 с.
2. Атутов А.А., Пронин Н.М., Тулохонов А.К. и др. Гидроэнергетика и состояние экосистемы озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 280 с.
3. Тулохонов А.К., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Андреев С.Г. Динамика изменения береговой линии оз. Байкал по разновременным космическим снимкам Landsat (на примере дельты р. Селенги) // Материалы международной научной конференции «Дельты Евразии: происхождение, эволюция, экология и хозяйственное освоение». Улан-Удэ, 16-20 августа 2010 г. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2010. С. 103-110.

Водные ресурсы России и Беларуси

Н.Я. Шапарев

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Введение

Природные ресурсы играют определяющую роль в жизнеобеспечении человека. Соответственно состояние и использование их должно всегда контролироваться на основе определенных показателей. В данной работе предлагается использовать для этого сформированную ранее автором систему показателей устойчивого природопользования [1-4]. В основе этой системы лежат показатели (индикаторы) устойчивого развития ООН [5], система отчетности по природным ресурсам в Российской Федерации и современные знания по природопользованию. Цель данной работы состояла в представлении и сопоставлении водных ресурсов Российской Федерации и Республики Беларусь.

Индикатор 1: общая характеристика водных ресурсов

В среднем по водности год ресурсы поверхностных вод по Беларуси оцениваются в $57,9 \text{ км}^3$ в год, из которых 34 км^3 (58,7 %) формируются на территории страны [6]. Естественные ресурсы пресных подземных вод составляют около $15,8 \text{ км}^3$ (43,5 млн. м^3 в сутки), однако разведанные утвержденные запасы составляют $2,3 \text{ км}^3$. Водообеспеченность общими водными ресурсами составляет 5,8 тыс. $\text{м}^3/\text{чел}$ в год. Для сравнения в Европе эта величина равна 4,6, в Польше и Украине – 1,7. В России она составляет 30 тыс. $\text{м}^3/\text{чел}$ [7].

Суммарные водные ресурсы России составляют $8302 \text{ км}^3/\text{год}$: речной сток 4270, озера 532, болота 1000, ледники 110, подземные воды 787, почвенная влага 3500.

Речной сток является приоритетным среди поверхностных вод для социально-экономического развития страны и на территории России формируется $4040 \text{ км}^3/\text{год}$ (10 % мирового стока, второе место в мире после Бразилии). В бассейн Северного Ледовитого и Тихого океанов приходится 90 % годового речного стока и лишь 8 % – на бассейны Каспийского и Азовского морей, где проживает около 80 % населения России и находится основная часть хозяйственной инфраструктуры. Около 65 % крупных городов пользуются поверхностными водами: Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Екатеринбург, Пермь, Волгоград, Омск, Ростов на Дону, Ярославль, Владивосток, Новосибирск и др.

Объем озера Байкал составляет 23 тыс. км^3 . Это 20 % мировых запасов незамерзающей пресной воды и 90 % национальных незамерзающих водных запасов.

Для регулирования водоотдачи используются водохранилища, число которых несколько десятков тысяч, а общая вместимость – около 800 км^3 . Из 65 тысяч гидротехнических сооружений России капитального ремонта требуют 20 %, 4 % находятся в аварийном состоянии.

Ресурсы подземных вод России составляют около $790 \text{ км}^3/\text{год}$, а запасы – $28 \text{ км}^3/\text{год}$, треть из них находится в Европейской части страны. Освоение разведанных месторождений подземных вод в РФ пока остается низким. Подземные воды используются в основном для хозяйственно-питьевого водоснабжения, и в среднем по России эта величина равна 127 л/сут. на человека.

В 2006 г. в России было добыто 25,0 млн. $\text{м}^3/\text{сут.}$ подземных вод, из них использовано 23,6 млн. $\text{м}^3/\text{сут.}$: хозяйственно-питьевое водоснабжение 69 %, производственно-техническое водоснабжение 28, на орошение земель и обводнение пастбищ – 3 %.

Индикатор 2: ежегодный забор поверхностных и подземных вод

Беларуси свойственна значительная дифференциация водообеспеченности. Так в густонаселенных центральных регионах страны (Минская область и г. Минск), где наиболее развита хозяйственная деятельность, имеются меньшие водные ресурсы по сравнению с периферийными регионами. Рост промышленного и сельскохозяйственного производства и высокие темпы урбанизации, естественно, сопровождались интенсификацией использования водных ресурсов, величина которых достигла максимального уровня в 1986–1990 гг., равного $2,9 \text{ км}^3$ в год (5 % доступного водного ресурса). Далее она уменьшалась в результате спада производства, однако в последние годы, несмотря на рост объемов производства, она по-прежнему уменьшается в результате проводимых мероприятий по рационализации использования водных ресурсов. В 2009 г. эта величина составила $1,337 \text{ км}^3$, почти треть ее потребляется в центральной части страны. Основное потребление воды связано с производственными (промышленными) нуждами (54 %), хозяйственно-питьевыми (ЖКХ) 37,4 %, с орошением и сельскохозяйственным водоснабжением – 8,6 %.

В Российской Федерации в 1991 г. водозабор составлял около 108 км^3 и снизился к 1999 г. до $78 \text{ км}^3/\text{год}$. С 1991 по 1999 гг. ВВП уменьшился на 40 %, в то время как водозабор сократился на 23 % и сброс загрязненных – также на 23 %. Это показывает структурную перестройку экономики страны в сторону усиления водоемких промышленных производств (горная добыча, переработка минерального сырья и др.) и уменьшения роли высокотехнологичных отраслей и отраслей с малым водопотреблением

и сбросом загрязненных сточных вод. Также росло потребление свежей воды в жилищно-коммунальном хозяйстве и постоянно расширяющейся городской инфраструктуре.

Коэффициент использования водного ресурса для различных рек в 1997 г. составлял: Неман – 0,04 %, Северная Двина – 1,47 %, Печора – 0,6 %, Дон – 63,8 %, Кубань – 25,5 %, Терек – 15,1 %, Волга – 14,8 %, Кама – 5,6 %, Урал – 60,5 %, Лена – 0,02 %, Енисей – 0,55 %, Ангара – 1,21 %, Обь – 1,32 %, Иртыш – 2,96 %, Тобол – 24,5 %, Томь – 11,7 %. В среднем по России эта величина составляет 3 % [7]. Видно, что к верхнему пределу близко использование водных ресурсов Кубани, Терека, Волги, Томи, Тобола значительно превышает допустимый предел для Дона и Урала.

В 2006 г. суммарный водозабор составил 79,3 км³. Из них 64 км³ – из поверхностных вод, 10 км³ – из подземных и 5 км³ – морской воды. Использовано было 62 км³ свежей воды: поверхностные воды – 49,4 км³, подземные – 7,7 км³, морской воды – 5 км³. В 2005 г. эта величина была меньше на 0,8 км³. Потери при транспортировке до водопотребителей составили более 10 %.

Производственно-социальный комплекс России в 2008 г. использовал около 200 км³, из которых 80 км³ составляли отбор из природных источников (использовано было 62,9 км³), остальное покрывается за счет инженерного воспроизводства в оборотных, повторно-последовательных и замкнутых системах [7].

Структура водопотребления в 2008 г. была такова: производственные нужды – 62,2 %; хозяйственно-питьевые нужды – 17,9; орошение – 12,7; сельскохозяйственное водоснабжение – 0,9; прочие нужды – 6,3.

Потери воды во внешних сетях при транспортировке от водоисточников до водопотребителей составили 7,8 км³ в 2008 г. Потери воды водопользователями, относящимися к разделу ОКВЭД «Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство» составили 25,4 % от объема затраченной воды, в основном на орошение.

Индикатор 3: доля повторно-оборотного, оборотного и последовательного использования воды

Использование оборотного, повторно-оборотного и последовательного использования воды улучшает характеристики водопользования. Объемы такого использования воды в Республике Беларусь представлены в табл. 1.

Таблица 1. Объем оборотной и последовательно используемой воды в Беларуси [6].

Потребитель	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Республика Беларусь	9515 (85 %)	7135 (89 %)	6155 (89 %)	6391 (90 %)	6369 (90 %)	6522 (90 %)	6349 (90 %)	6697 (90 %)	6134 (89 %)

С 1965 до середины 1970-х гг. высокие темпы экономического роста в России обусловили увеличение потребления воды в 2–2,5 раза. Далее рост экономики замедлился, стали внедряться водосберегающие технологии, и воздействие на водные ресурсы практически стабилизировалось. С 1970 по 1990 гг. величина оборотной и последовательно используемой воды увеличилась в 3 раза [8].

В 1980-е гг. потребление воды в промышленности России составляло 52–57 км³. Такая стабилизация водопотребления была связана с активным введением мощнейшего оборотного и повторно-последовательного водоснабжения, который за 10 лет увеличился на 48 % – со 115 до 171 км³. С 1991 по 2002 гг. использование свежей воды сократилось с 54 до 38 км³, оборотной и повторно-последовательной – со 171 до 134 км³. Сокращение водопотребления было связано с общей экономической дестабилизацией в стране. С 1990 по 1996 гг. выпуск промышленной продукции в России (в ценах 1990 г.) упал с 556 до 262 млрд. руб. [8].

Индикатор 4: удельный расход воды на единицу произведенного валового продукта

По сравнению с 1990 г. в 2000 г. удельная водоемкость экономики России выросла в 2 раза, Швеции осталась на том же уровне, в Великобритании в 2 раза уменьшилась.

В 2000 г. удельная водоемкость экономики на единицу ВВП составила в России 0,3 м³/дол. (в Швеции – 0,012, Великобритании – 0,007, Беларуси – 0,22) [9].

Индикатор 5: бытовое потребление воды на душу населения

Величина потребления питьевой воды на одного жителя Беларуси в среднем составляет 218 л/сут. Эта величина существенно выше душевого потребления воды в большинстве стран Европы (100–150 л/сут.).

Удельное водоснабжение в России в настоящее время составляет 367–369 л/сут на одного городского жителя, что в три раза превышает европейские показатели.

Главным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения являются поверхностные воды, более 40 % водопроводов обеспечивающих 68 % водопотребителей в городах и поселках городского типа и около 10 % в сельской местности, не имеют необходимого комплекса очистных сооружений для

обеззараживания и очистки воды. Качество воды в большинстве водных объектов не отвечает нормативным требованиям.

Индикатор 6: качество питьевой воды

Показатель качества воды в Республике Беларусь определяется индексом загрязненности (ИЗВ). Расчет выполняется по шести ингредиентам: растворенного кислорода, легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅), азота аммонийного, азота нитридного, фосфора фосфатного и нефтепродуктов.

Классификация качества воды такова: I класс – вода чистая (ИЗВ ≤ 0,3), II – относительно чистая (ИЗВ > 0,3÷1,0), III – умеренно загрязненная (ИЗВ > 1,0÷2,5), IV – загрязненная (ИЗВ > 2,5÷4,0), V – грязная (ИЗВ > 4,0÷6,0), VI – очень грязная (ИЗВ > 6,0÷10,0), VII – чрезвычайно грязная (ИЗВ > 10,0).

Согласно данным мониторинга и оценке окружающей среды водные экосистемы Республики Беларусь стабильно функционируют, а значения показателей и концентрации большинства ингредиентов не отличаются от многолетних данных [10].

Согласно данным мониторинга в 2009 г. 85 % озер и водохранилищ республики имеют достаточно высокий экологический статус, 8 % из которых (преимущественно расположенные в бассейне р. Западная Двина) классифицируются как "чистые" [10].

Согласно данным режимных наблюдений и проведенной оценке качества поверхностные воды республики на контролируемых участках водных объектов в 2009 г. классифицировались [10]:

- бассейн р. Западная Двина: 12,1 % – "чистые" (в 2008 г. – 21,2 %), 81,8 % – "относительно чистые" (в 2008 г. – 74,2 %), 6,1 % – "умеренно загрязненные" (в 2008 г. – 4,5%);
- бассейн р. Неман: 3,1 % – "чистые" (в 2008 г. – 3,2 %), 92,2 % – "относительно чистые" (в 2008 г. – 93,5 %), 3,1 % – "умеренно загрязненные" (в 2008 г. – 3,2 %), 1,6 % – "загрязненные" (в 2008 г. – категория "загрязненные" не определялась);
- бассейн р. Западный Буг: 58,3 % – "относительно чистые" (в 2008 г. – 66,7 %), 41,7 % – "умеренно загрязненные" (в 2008 г. – 33,3 %);
- бассейн р. Днепр: 80,5 % – "относительно чистые" (в 2008 г. – 73,2 %), 16,9 % – "умеренно загрязненные" (в 2008 г. – 22,5 %), 1,3 % – "загрязненные" (в 2008 г. – 1,4 %), 1,3 % – "грязные" (в 2008 г. – 2,8 %);
- бассейн р. Припять: – 73,3 % – "относительно чистые" (в 2008 г. – 78,9 %), 26,7 % – "умеренно загрязненные" (в 2008 г. – 21,1 %).

Согласно результатам гидрологических наблюдений в 2009 г. состояние речных экосистем Республики Беларусь осталось на уровне прошлого года. Доля водных объектов, характеризовавшихся II – III классами ("чистые" – "умеренно загрязненные") составляет 75 % водотоков, III классом ("умеренно загрязненные") – 17 %, III – IV классами ("умеренно загрязненные" – "загрязненные" – 8 %.

В 2009 г. состояние водных экосистем озер и водохранилищ страны несколько ухудшилось. Количество водоемов, соответствующих II – III классам, составило 37 %. Доля водоемов, соответствующих III классу, составила 63 %. Водоемы I класса ("чистые") отсутствуют.

Результаты химических анализов подземных (грунтовых и артезианских) вод в 2009 г. показали, что 94,3 % проб соответствуют санитарно-гигиеническим нормам. По сравнению с 2008 г. среднее содержание основных контролируемых макрокомпонентов несколько увеличилось, однако они находятся в пределах 0,04–0,48 ПДК, а это свидетельствует об удовлетворительном качестве подземных вод. Анализы на содержание микроэлементов показали, что их величина также значительно ниже ПДК. Однако по всей республике в подземных водах зафиксировано повышенное содержание железа, реже марганца, что обусловлено природным происхождением.

В России с каждым годом обостряется проблема обеспечения населения питьевой водой нормативного качества. Отходами жизнеобеспечения и хозяйственной деятельности загрязнено большинство рек и озер России, "качество поверхностных вод практически повсеместно не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям, поэтому больше половины населения России сегодня использует воду, не соответствующую гигиеническим нормам" [11; 12].

В настоящее время 70 % рек и озер и 30 % запасов подземных вод России утратили свое значение как источники питьевого водоснабжения [13]. Поверхностными водами, которые в большинстве случаев не отвечают нормативным требованиям, обеспечивается 68 % населения, оставшиеся 32 % приходится на долю подземных вод, которые отвечают требованиям ГОСТа "Вода питьевая".

В целом в России сложилась неблагоприятная обстановка по обеспечению населения питьевой водой нормативного качества, причина которой не только в экологических факторах, но и в низких темпах развития водопроводно-канализационного хозяйства и неудовлетворительном комплектовании техникой, материалами и оборудованием.

В 2008 г. качество поверхностных вод России по гидрохимическим показателям выполнялось в соответствии со следующей классификацией: 1 класс – "условно чистая", 2 класс – "слабо загрязненная", 3 класс – "загрязненная", 4 класс – "очень загрязненная", 5 класс – "грязная", 6 класс – "очень грязная", 7 класс – "экстремально грязная" [7]. На основе гидрохимической сети наблюдений Роскомгидромета за 2008 г. реки и водохранилища России можно классифицировать следующим образом [7]:

- условно чистые: Иркутское, Братское водохранилища и р. Лена (верховье);
- слабо загрязненные: реки Ока, Воркута, Ангара и водохранилища Горьковское и Братское;
- загрязненные: реки Неман, Сухона, Вычегда, Печора, Волга, Обь, Иртыш, Ока, Зeya, Северная Двина, Сухона, Москва, Дон, Кубань, Воркута, Лена и водохранилища Горьковское Воткинское, Рыбинское, Угличское, Саратовское, Волгоградское, Камское, Цимлянское;
- очень загрязненные: реки Нева, Неман, Сухона, Вычегда, Северная Двина, Москва, Печора, Волга, Иртыш, Енисей, Вилюй, водохранилища Угличское, Горьковское, Камское;
- грязные: реки Преколя, Волга, Северная Двина, Сухона, Вычегда, Терек, Чулым, Тобол, Лена, Алдан, Амур, Ока, Обь, Иртыш, Енисей, Ангара, Зeya и водохранилища Ивановское, Угличское, Белгородское;
- очень грязные: реки Белая, Терек, Обь, Исеть, Амур;
- экстремально грязные: реки Преколя, Дон, Чусовая.

Воды большинства рек России оцениваются как "загрязненные". В среднем по стране превышение ПДК составляет по нефтепродуктам 47-63 %, фенолам – 23-26 %, аммиачному азоту – 23-34 %, соединениям меди – 74-81 %, цинка – 36-63 %.

Индикатор 7: объем сброса сточных вод

Данные по сбросу сточных вод в Республике Беларусь представлены в табл. 2.

Сброс сточных вод с 1990 по 2009 гг. уменьшился почти вдвое (с 2148 млн. м³ до 1060), так как использование свежей воды также уменьшилось практически в два раза. Но что важно отметить: доля нормативно-чистых вод за это время уменьшилась с 48,6 до 27 %, нормативно очищенных возросли с 46,4 до 70,3 %, а загрязненных упали с 5,2 до 0,3 %. В 2009 г. по отраслям экономики она была такова: в промышленности – 14,5 %, в ЖКХ – 60,67 %, в сельском хозяйстве – 24,64 %, прочие отрасли – 0,3 %.

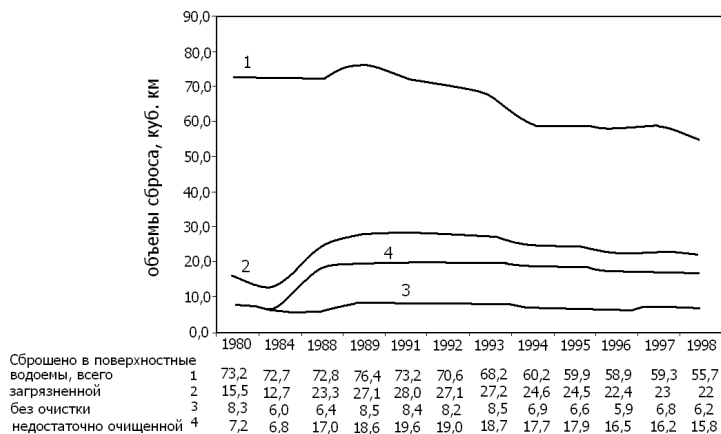
Данные по динамике сброса сточных вод в поверхностные воды в Российской Федерации представлены на рисунке. За период с 1988 по 1991 гг. рост объемов загрязненных сточных вод в поверхностные водные объекты увеличился с 23,3 до 28,0 км³, затем он уменьшился до 22 км³ в 1998 г. В 1991 г. вклад сточных загрязненных вод промышленности составлял 43,4 %, а жилищно-коммунального хозяйства 43,9 %. В 1998 г. этот показатель для коммунального хозяйства был в два раза выше, чем для промышленности. После жилищно-коммунального хозяйства основными загрязнителями являются энергетика, химическая и нефтехимическая, целлюлозно-бумажная и деревообрабатывающая промышленность.

Водоотведение в 2002 г. составило около 55 км³ в год, 40 % которого составляли загрязненные и недостаточно очищенные воды. Связано это с недостаточными мощностями очистных сооружений и снижением эффективности их работы. В целом по России сбрасывается 21 % сточных вод без всякой очистки.

Таблица 2. Сброс сточных вод (млн. м³) [6].

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Сброс сточных вод* – всего	2148	1464	1307	1250	1234	1165	1118	1065	1060
в т.ч. в поверхностные водоемы	1982	1329	1173	1138	1124	1059	1015	966	974
из них:									
нормативно-чистые (без очистки)	959	424	265	261	268	233	246	246	286
нормативно-очищенные	919	841	883	866	846	817	760	709	685

* Без учета транзитной воды и шахтно-рудничных вод.



Динамика сброса сточных вод в поверхностные водные объекты [14].

Работа очистных сооружений неэффективна, и они имеют низкий процент извлечения загрязняющих веществ. Причиной тому – устаревшие схемы очистки, несовершенство технологического оборудования, несоответствие типа очистки категории сбрасываемых вод. В результате в России до нормативного уровня очищается не более 10 % сточных вод. Следует отметить, что сокращение объемов расхода свежей воды и сброса загрязняющих веществ меньше уровня падения объемов производства, и в течение последних лет сохраняется тенденция ухудшения качества воды в бассейнах основных рек.

Ежегодно в бассейн Волги отводится 37-40 % суммарного стока загрязненных вод России, Оби – 10-12 %, Енисея – 6-7 %, Кубани – 5-6 %, Дона – 5 %.

С 1991 г. объем сброса загрязненных сточных вод уменьшился, несмотря на это, антропогенная деятельность по-прежнему отрицательно сказывается на водных ресурсах. Поверхностные воды в России загрязнены повсеместно, а качество их не улучшается, хотя идет снижение массы загрязняющих веществ. Государство не имеет эффективного контроля загрязнений, которые поступают в водоемы с поверхностным стоком, через атмосферу, а также через ливневые сточные воды.

Работа очистных сооружений неэффективна, и они имеют низкий процент извлечения загрязняющих веществ. Причиной тому – устаревшие схемы очистки, несовершенство технологического оборудования, несоответствие типа очистки категории сбрасываемых вод. В результате в России до нормативного уровня очищается не более 10 % сточных вод.

Индикатор 8: трансграничный перенос загрязняющих веществ

РФ подписала соглашение о совместном использовании и охране трансграничных водных объектов с Норвегией, Финляндией, Эстонией, Украиной, Беларусью, Казахстаном, Монголией. Многократные попытки подписания такого соглашения с Китаем (1997, 2000, 2001 гг.) не увенчались успехом.

Качество трансграничных поверхностных вод, расположенных на границе России с Беларусью контролируется в 7 пунктах на 7 водных объектах. По сравнению с 2007 г. в 2008 г. ухудшилось состояние рек Западная Двина, Днепр, Сож, улучшилось – рек Ипуть, Остер, Вихра, не изменилось – рек Каспля и Десна.

Важным отличием России от других стран СНГ является высокая водообеспеченность и отсутствие значительного трансграничного речного стока.

Согласно прогнозу Роддэ, между 2035 и 2045 гг. объемы потребления свежей воды в мире сравняются с доступными для извлечения водными ресурсами. Вслед за "нефтяным" периодом водные ресурсы могут стать главным преимуществом России в будущем [9], так как Россия имеет 10 % стока рек мира и 20 % мировых незамерзающих озерных вод в Байкале.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН (Программа № IV.31.2, рук. академик Шокин Ю.И.; проект № 31.2.10, рук. д.ф.-м.н. Шапарев Н.Я.) и Программы интеграционных исследований СО РАН (проект № 116, рук. д.т.н. Москвичев В.В.).

Литература

1. Шапарев Н.Я. Природные ресурсы Красноярского края // Вест. РАН. 2007. Т. 77, № 4. С. 291-300.
2. Shaparev N., Astafiev N. Water resources of the Krasnoyarsk Krai in sustainable development indices // Intern. J. Sustainable Development and World Ecology. 2008. Vol.15, N 6. P. 1-10.
3. Шапарев Н.Я. Региональное устойчивое природопользование (Красноярский край) // Вестн. РАН. 2009. Т. 79, № 10. С. 37-43.
4. Шапарев Н.Я. Введение в проблемы устойчивого развития. Красноярск: Изд-во КГПУ, 2010. 367 с.
5. Показатели устойчивого развития: структура и методология. пер. с англ. / В.Р. Цибульский (ред.) // Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 2000. 358 с.
6. Статистический ежегодник Республики Беларусь. 2010. 430 с.
7. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2008 году» МПР РФ. М., 2009. 487 с.
8. Зайцева И.С. Использование воды в промышленности современной России // Изв. РАН. Сер.: геогр. 2000. № 25. С. 28-36.
9. Данилов-Данильян В.И. Дефицит пресной воды и мировой рынок // Водные ресурсы. 2005. Т. 32, № 5. С. 625-633.
10. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2009. Минск, 2010. 350 с.
11. Концепция государственной политики в сфере использования, восстановления и охраны водных объектов // Использование и охрана природных ресурсов России. 2000. № 6. С. 36-46.
12. Россия: водохозяйственное устройство / А.М. Черняева (ред.) // Екатеринбург: Изд-во «Аэрокосмология», 1999. 400 с.
13. Россия: социально-экологические водные проблемы / А.М. Черняева (ред.) // Екатеринбург: Изд-во «Аэрокосмология», 1999. 273 с.
14. О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации за 1988-1998 годы. Приложение 2 к Государственному докладу «О состоянии окружающей природной среды РФ в 1998 году». М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1999.

Лесные ресурсы России и Беларуси в показателях устойчивого развития

Н.Я. Шапарев

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Введение

Мониторинг природных ресурсов позволяет судить об их состоянии и возможности использования. В данной работе предлагается это делать на основе системы показателей устойчивого природопользования, которая была разработана автором [1-4] на основе системы показателей ООН [5], системы отчетности лесопользования в Российской Федерации [6] с опорой на уровень современных знаний о природопользовании. Целью работы было представление и сопоставление лесных ресурсов Российской Федерации и Республики Беларусь.

Критерий 1: поддержание и сохранение продуктивной способности лесов

В Республике Беларусь на 01.01.2010 г. лесные земли занимали 8539 тыс. га (41,1 %). С 2006 по 2010 гг. общая площадь лесного фонда выросла с 9182 до 9264 тыс. га (на 0,22 %), площадь, покрытая лесом, увеличилась с 7952 до 8064 тыс. га, а лесистость с 38,3 до 38,8 % (по прогнозу на 2015 г. она может превысить 40 %). Лесопокрытая площадь увеличилась в основном за счет искусственного и естественного облесения малопродуктивных и неудобных для сельскохозяйственного производства земель [7]. Все леса в Беларуси являются исключительной собственностью государства.

Распределение земель лесохозяйственных организаций на 01.01.2010 г., в том числе лесных земель и их распределение по областям республики, представлено на рис. 1.

Леса Беларуси делятся на две группы. Первую группу составляют, выполняющие преимущественно водоохранные, защитные, санитарно-гигиенические и оздоровительные функции и доля их составляет 49,8 %. Во вторую группу включены леса, которые наряду с экологическим имеют эксплуатационное значение и в структуре лесного фонда они занимают 50,2 %. Рекреационное лесопользование в настоящее время проводится на площади 1,3 млн. га (17,8 % всей лесопокрытой территории) и в перспективе расширится до 2,5 млн. га.

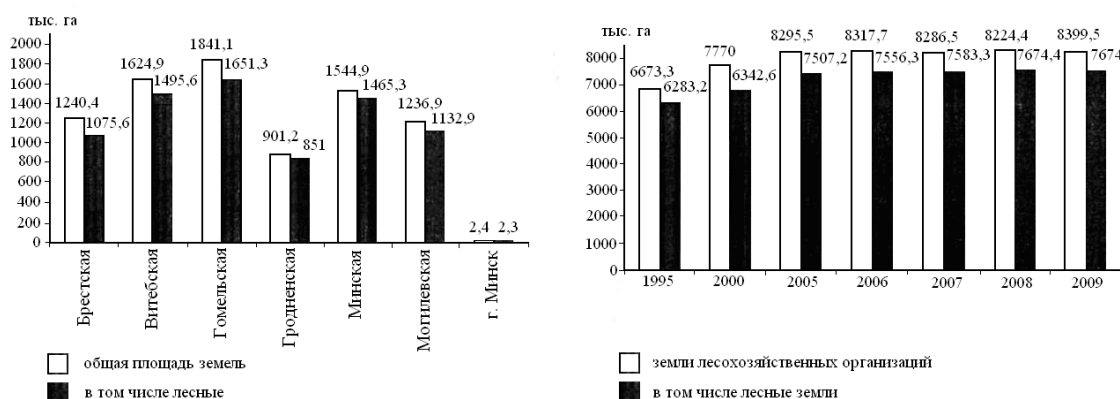


Рис. 1. Распределение земель по административным областям и динамика земель лесохозяйственных организаций по состоянию на 01.01.2010 г. [8].

Табл. 1. Сведения о землях лесного фонда и землях иных категорий, на которых расположены леса [9].

Земли, на которых расположены леса	Общая площадь, тыс. га	Лесные земли, тыс. га	Покрытые лесной растительностью, тыс. га	Запас древесины, млн. м ³
Леса Российской Федерации	1181936,8	890796,1	796225,1	83298,20
из них:				
лесной фонд Российской Федерации	1118352,9	838069,2	746309,7	76404,08
Земли, не входящие в лесной обороны и безопасности населенных пунктов	4341,7	3593,3	3292,8	
особо охраняемых природных территорий	1382,0	1149,7	1022,0	
Минсельхоза России	26602,6	17572,2	27938,4	
Иных категорий	29383,9	29012,5	27938,4	
	1873,7	1399,2	1063,5	

Общая площадь земель Российской Федерации, на которых расположены леса, составляет 1181,9 млн. га (табл. 1). Площадь, покрытая лесной растительностью, равна 796,2 млн. га. Лесные земли составляют 75 % от земель лесного фонда и занимают 52 % территории страны.

Россия имеет 22 % мировой лесопокрытой территории (72 % из них – хвойные леса) и 21 % общемирового расчетного запаса леса на корню.

Площади лесов, которые располагаются на землях лесного фонда, занимают 1118352,9 тыс. га и по целевому назначению подразделяются на защитные – 249572,7 тыс. га (22,3 %), эксплуатационные – 590646,0 тыс. га (52,8 %) и резервные – 278134,2 тыс. га (24,9 %). Лесистость территории России составляет 45,4 % [10].

Общая площадь лесопокрытой территории в России за последние годы увеличивается. Так, с 1993 по 1998 гг. эта величина составила 12,9 млн. га (3,9 млн. га пришлось на Европейско-Уральскую часть России). Причем площади лесов I и II групп увеличились на 5,8 и 5,1 % соответственно, а площадь лесов III группы сократилась на 1,9 %. Площадь лесов I группы возросла за счет возрастания площади противозероэрозийных лесов (5,3 млн. га), запретных полос, защищающих нерестилища ценных промысловых рыб (на 4,5 млн. га), и национальных парков (на 3,6 млн. га).

Общая площадь лесного фонда и лесов, не входящих в него, на 1 января 2007 г. в Российской Федерации составляла 11742 млн. га (64,5 % территории России) с запасом древесины 76,9 млрд. м³. Площадь земель, покрытых лесной растительностью, составляет 64,7 % от общей площади (около 60 % суши России), из которых 37 % (279 млн. га) приходится на Дальний Восток, 41 % (295 млн. га) – на Сибирь и 22 % (167 млн. га) – на европейскую часть России.

Критерий 2: поддержание приемлемого санитарного состояния и жизнестойкости лесов

В табл. 2 представлены данные по проведению основных работ в лесном хозяйстве Республики Беларусь.

Лесоустройство на территории республики выполняется ежегодно на территории около 1 млн. га, что составляет около 13 % лесного фонда.

Лесовосстановление и лесоразведение с 1990 по 2009 гг. составляло ежегодно от 30 до 56,2 тыс. га (в среднем 0,5 % лесного фонда), подавляющая часть которого выполняется посадкой и посевом леса. Более 10 % этих работ выполняется селекционными посадочными и улучшенными посевными материалами. Благодаря лесовосстановлению в разные периоды на территории Беларуси создавались искусственные насаждения (лесные культуры), площади которых в данное время около 3 млн. га (25 % лесопокрытой территории).

Лесная площадь, пройденная пожарами, составляет ежегодно около 1–1,7 тыс. га (около 0,01 %), а сторает и повреждается лесов на корню ежегодно около 11–80 тыс. м³ (табл. 3).

Табл. 2. Проведение основных работ в лесном хозяйстве Республики Беларусь [7].

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Лесоустройство, тыс. га	999	1194	1074	821	791	979	1096	1139	1179
Лесовосстановление и лесоразведение, тыс. га	30,2	22,6	38,3	53,6	51,5	56,2	55,0	50,0	40,8
в том числе посадка и посев	26,7	20,2	33,0	47,4	45,0	48,7	48,1	43,1	34,3
из них селекционным посадочным и улучшенным посевным материалом	...	...	3,5	4,2	4,8	5,1	5,9	7,0	6,0
Ввод молодняков в категорию ценных древесных насаждений, тыс. га	30,7	30,7	23,0	25,1	34,0	36,3	37,5	39,5	43,0
Посажено сеянцев в питомниках, млн. шт.	9,1	8,9	9,3	9,0	9,2	9,0	8,1	9,6	21,0
Заготовлено семян древесных и кустарниковых пород, т	121,1	100,8	32,3	69,5	208,8	300,4	95,8	193,7	95,9
Вырублено всеми видами рубок:									
площадь, тыс. га	398	415	415	409	441	452	520	488	403
ликвидная древесина, тыс. м ³	10327	9302	10787	15530	14109	13499	14923	15056	13218
Рубки леса главного									
площадь, тыс. га	3	21,8	20,4	23,3	25,1	25,3	28,5	24,4	22,4
ликвидная древесина, тыс. м ³	5611	4377	4303	4876	5213	5447	6126	5460	5128

Данные по охране и защите лесов в Беларуси представлены в табл. 4, из которой видно, что практически все леса охраняются от пожаров с помощью авиации.

Данные по лесовосстановлению в Российской Федерации приведены в табл. 5. В 2006 г. лесовосстановление было проведено на площади 877,3 тыс. га (0,1 %) лесного фонда; посев и посадка составили 194,5 тыс. га (22,5 %), естественное возобновление – 688,8 тыс. га. В 2006 г. площади лесовосстановления были более чем в два раза меньше площадей лесовосстановления в 1980-х гг. Если 20–30 лет назад ежегодно закладывалось по 100–150 тыс. га полезащитных лесных полос, насаждений на оврагах, балках, песках и других неудобных землях, то в 2006 г. было посажено только 5,5 тыс. га защитных лесонасаждений.

Табл. 3. Лесные пожары в Беларуси [7].

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Число лесных пожаров, случаев	2471	3257	2569	1121	1114	3252	1079	673	1485
Лесная площадь, пройденная пожарами, га	1022	3780	1760	560	322	2508	613	411	1684
Сгорело и повреждено леса на корню, тыс. м	11,0	57,7	38,5	9,4	6,3	39,9	4,5	14,5	84,4

Табл. 4. Охрана и защита лесов (тыс. га) [7].

	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Защита лесов от вредителей и болезней биологическим методом	14,1	42,4	19,3	22,6	21,6	22,3	22,7	22,6	22,6
Охрана лесов от пожаров с помощью авиации	7136	6983	7277	8470	8753	9324	9335	9313	9326

Табл. 5. Лесовосстановление в Российской Федерации, тыс. га [11].

Год	Лесовосстановление (всего)	В том числе	
		посев и посадка леса	содействие естественному возобновлению леса
1950	538	284	254
1960	1112	434	678
1970	1731	724	1007
1975	1809	775	1034
1980	1862	820	1042
1985	1875	719	1156
1990	1831	566	1265
1991	1562	521	1041
1992	1402	447	955
1993	1461	428	1033
1994	1562	391	1171
1995	1454	367	1087
1996	1110	305	805
1997	1092	267	825
1998	1019	260	759

Табл. 6. Динамика лесных пожаров и их последствий в Российской Федерации за 1991-1996 гг. [9,11,12].

Показатель	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Число случаев лесных пожаров, тыс. ед.	18	25,8	18,4	20,3	26,0	32,8
Лесная площадь, пройденная пожарами: всего тыс. га	682	691,5	748,6	536,8	360,1	1853,5
в расчете на 1 пожар, га	38	26,8	40,7	26,4	13,9	56,5
Сгорело и повреждено леса на корню, млн. м ³	10	11,1	22,3	10,2	8,5	55,9

Табл. 7. Динамика лесных пожаров и их последствий в Российской Федерации за 1997-2008 гг. [9,11,12].

Показатель	1997	1998	1999	2000	2003	2006	2008
Число случаев лесных пожаров, тыс. ед.	31,3	28,0	36,6	22,4	33,1	32,5	26,3
Лесная площадь, пройденная пожарами: всего тыс. га	726,7	4268,8	751,7	1328,6	2353	1494	2070
в расчете на 1 пожар, га	23,2	152,6	20,5	59,3			
Сгорело и повреждено леса на корню, млн. м ³	21,8	143	21,9	39,6			

На 01.01.2008 г. фонд лесовосстановления на землях лесного фонда был равен 29445,7 тыс. га, который на 74 % представлен гарями.

В 1999 г. площадь погибших насаждений была равна 312 тыс. га (283 тыс. га – хвойные), причем 69 % этих площадей – в районах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Основная причина гибели – пожары, а также болезни леса, повреждения вредными насекомыми и дикими животными, антропогенные факторы, неблагоприятные погодные условия. В 2006 г. площадь, пройденная лесными пожарами, составила 1961 тыс. га (0,02 %), из них 68 % пришлось на Красноярский край, Амурскую и Иркутскую области.

Динамика лесных пожаров в Российской Федерации представлена в табл. 6 и 7.

Федеральная служба лесного хозяйства России считает, что отсутствие необходимых мероприятий приводит к тому, что из-за пожаров, вредителей и болезней погибает 2 млн. га лесов в год.

Критерий 3: использование лесных ресурсов

Лесопользование в республике осуществляется по принципу непрерывности и неистощительности. Согласно табл. 2 рубки леса главного пользования составляют площади 20–28 тыс. га ежегодно, на которых получают свыше 5 млн. м³ ликвидной древесины. Общие заготовки ликвидной древесины составляют 10–15 млн. м³ (1÷1,5 м³ на человека) ежегодно.

Среднегодовой объем лесопользования в последние годы составляет 1,5–1,7 м³ древесины с 1 га лесопокрытой площади, а это в 2,4 раза меньше ежегодного прироста древесины – 3,6 м³/га. К 2015 г. ожидается рост расчетной лесосеки главного пользования почти в 2 раза, а это позволит существенно расширить масштабы всех видов лесопользования и увеличить экспорт древесины. В последние годы расчетная лесосека по рубкам главного пользования использовалась на 70–80 %.

Суммарный запас древесины в Российской Федерации по данным 2008 г. равен 83,3 млрд. м³. Ежегодно средний прирост в лесах России составляет 1,23 м³ на 1 га.

В 1988 г. Россия заготавливала 354 млн. м³ древесины и занимала второе место после США (386 млн. м³). В 2008 г. в системе Рослесхоза было заготовлено 166,4 млн. м³ (1,1 м³ на человека) древесины. Размер ежегодного отпуска на Участки лесного фонда, арендованные для заготовки древесины, эксплуатируются лишь на 50 %, но необоснованно наращиваются объемы сплошных санитарных рубок с целью увеличения внебюджетных доходов.

В страны Западной Европы в 1998 г. экспортировано: 12,3 млн. м³ круглых лесоматериалов, 2,5 млн. м³ пиломатериалов, 660 тыс. м³ целлюлозы и 392 тыс. м³ бумаги.

Поставки круглого леса из России в Китай составляли в 1998 г. 1,7 млн. м³, 2001 г. – 8,6 млн. м³, 2002 г. – 13,8 млн. м³, а в 2004 г. – 15,4 млн. м³. Стоимость экспортной продукции лесопромышленного сектора экономики в млрд. долларов составляла: 2000–2002 гг. – Россия – 4,6; Китай – 6,5; 2005–2006 гг. – Россия – около 6, Китай – около 30. Итак, в 2000 г. Россия получала от экспорта продукции лесного сектора около 4 млрд. долларов, Китай – 6,5 млрд. долларов. Около 70 % лесного экспорта Китая сделано из российской древесины. Спустя 5 лет российский экспорт достиг 6–6,5 млрд. дол., а китайский – около 30 млрд. дол.. Последний в несколько раз превышает всю прибыльность российского экспорта оружия в Китай [13; 14].

Более половины лесов России находится на вечномерзлотных почвах (Сибирь и Дальний Восток), в результате чего они имеют низкую продуктивность и фрагментарность. Для эксплуатации доступны лишь 45 % площади лесов, расположенных в основном на севере европейской части России, Урале и вдоль Транссибирской магистрали, однако они сильно истощены в результате интенсивной эксплуатации в прошлом столетии. Из общего запаса древесины – 76,9 млрд. м³ – спелые и перестойные составляют 43,2 млрд. м³. Средний запас древесины на 1 га составляет 132 м³, ежегодный прирост запаса древесины в лесах России – 936 млн. м³, или 1,23 м³ на 1 га лесопокрытых земель [10].

Критерий 4: сохранение и поддержание биологического разнообразия лесов, и их вклады в глобальный углеродный цикл

Распределение покрытых лесом земель лесного фонда Республики Беларусь по преобладающим породам таково: сосна – 50,4, береза – 22,9, ель – 9,5 %. Из мягколиственных пород значительные площади занимают черноольшанники, осинники, сероольшанники. Среди твердолиственных пород значительная часть принадлежит дубравам, редко встречаются ясеневые и грабовые насаждения, кленовики и липняки встречаются еще реже. Средний возраст белорусских лесов около 51 года. По возрастным категориям они распределяются так: молодняки – 36,4, средневозрастные – 44,4, приспевающие – 14,2, спелые и перестойные – 4,7 %. Дефицит двух последних определяет возможность дальнейшей эксплуатации лесных ресурсов.

Леса России в основном являются бореальными (86 %). Главные лесобразующие породы лесного фонда: лиственница, сосна, ель, дуб, бук, береза, осина. Занимают они 89,8 % лесопокрытых земель, из которых хвойные группы – 69,6, твердолиственные – 2,4, мягколиственные – 17,8 %. Такие породы как груша, каштан, орех грецкий, орех маньчжурский занимают менее 1 % лесопокрытых земель, остальную площадь занимают кустарники.

Леса России содержат 15 % расчетного наземного углеродного баланса. На Россию также приходится 75 % запаса связанного углерода в зоне бореальных лесных экосистем (на Канаду – 15 %, на Аляску – 2 %, на Скандинавию – 8 %).

В лесах России накоплено около 80 млрд. т биомассы (40 млрд. т углерода, в том числе 32,6 млрд. т в живой и 7,4 млрд. т в мертвой фитомассе). Депонирование углерода лесами России, рассчитанное по методике МГЭИК, составляет 610 млн. т углерода в С/год. Уменьшение углерода за счет эмиссии CO₂ – около 100 млн. т С/год. Соответственно, чистое ежегодное депонирование углерода в живой и мертвой биомассе лесов России – около 510 млрд. т С/год. Величина эта составляет около 1/3 углеродного баланса, рассчитанного для всех лесов земного шара.

Россия производит очистку атмосферы от CO₂ для мирового сообщества примерно на два триллиона долларов. Мы имеем 21 % лесов, даем эмиссии CO₂ 7 %. США дает 23 % CO₂, а имеет 6 % лесного покрытия. Германия – 0,3 % лесов, 1 % населения, а вырабатывает 4 % CO₂.

Заключение

Перспективная деятельность в лесах Беларуси определяется концепцией устойчивого развития лесного хозяйства Республики Беларусь до 2015 г. Главными ее направлениями являются [8]:

- сохранение многогранной роли и разнообразных функций всех видов лесов;
- совершенствование мероприятий по охране, рациональному использованию и сохранению лесов, увеличению лесистости малолесных районов;
- содействие эффективному использованию всего комплекса товаров и услуг, получаемых за счет эксплуатации лесных угодий и лесных массивов.

В настоящее время леса России рассматриваются как огромный резерв древесины для своих потребностей и для мировой лесной промышленности. Однако надо учитывать, что значительная часть лесов России расположена в отдаленных районах, имеет малый потенциал роста и весьма чувствительную окружающую среду. На этой территории также проживает большое число коренных народностей, которые ведут традиционный образ жизни, используя охоту, рыбную ловлю, разводят северных оленей, а самое главное – используют лесные ресурсы. Их численность – около 190 тыс. человек.

Основные проблемы состояния и использования Российского лесного фонда таковы [15]:

1. Несоответствие между значительной величиной лесоресурсного потенциала России и его второстепенной ролью в отечественной экономике.
2. Низкий уровень использования расчетной лесосеки.
3. Аномальность возрастной структуры отечественных лесов, где преобладают спелые и перестойные насаждения.
4. Неразвитость инфраструктуры лесопромышленного комплекса и прежде всего достаточной сети современных лесных дорог.
5. Несовершенство структуры отечественного экспорта лесобумажной продукции с преобладанием в ней круглого леса.
6. Значительные потери лесных ресурсов России, обусловленные пожарами, естественными вредителями леса и различного рода лесными правонарушениями.
7. Снижение уровня лесовосстановительных работ.

Лесопромышленный комплекс включает лесозаготовительную, деревообрабатывающую, целлюлозно-бумажную и лесохимическую отрасли. Основными факторами, сдерживающими развитие комплекса, являются: низкий технический уровень производства; высокая степень износа основных производственных факторов; недостаточный объем инвестиций в основной капитал; отсутствие мощностей для глубокой переработки древесины; значительные затраты на энергетические ресурсы и железнодорожные тарифы в себестоимости лесобумажной продукции; собственники объектов лесопромышленного комплекса, как отечественные, так и иностранные, предпочитают извлекать краткосрочные выгоды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН (Программа № IV.31.2, рук. академик Шокин Ю.И.; проект № 31.2.10 рук. д.ф.-м.н. Шапарев Н.Я.) и Программы интеграционных исследований РАН (проект № 116, рук. д.т.н. Москвичев В.В.).

Литература

1. Шапарев Н.Я. Природные ресурсы Красноярского края // Вестн. РАН. 2007. Т. 77, № 4. С. 291-300.
2. Shaparev N., Astafiev N. Water resources of the Krasnoyarsk Krai in sustainable development indices // Intern. J. Sustainable Development and World Ecology. 2008. Vol.15, N 6. P. 1-10.
3. Шапарев Н.Я. Региональное устойчивое природопользование (Красноярский край) // Вестн. РАН. 2009. Т. 79, № 10. С. 37-43.
4. Шапарев Н.Я. Введение в проблемы устойчивого развития. Красноярск: Изд-во КГПУ, 2010. 367 с.
5. Показатели устойчивого развития: структура и методология. пер. с англ. / В.Р. Цибульский (ред.) // Тюмень: Институт проблем освоения Севера СО РАН, 2000. 358 с.

6. Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации. Приказ Федеральной службы лесного хозяйства № 21 от 05.02.1998.
7. Статистический ежегодник Республики Беларусь. 2010.
8. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2009. Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Минск, 2010. 350 с.
9. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2008 году». М.: Министерство природных ресурсов РФ. 488 с.
10. Уткин А.И. Углеродный цикл и лесоводство // Лесоведение. 1995. № 5. С. 3-20.
11. Яцкевич Б.А., Пак В.А., Рыбальский Н.Г. Природные ресурсы и окружающая среда России. М.: Изд-во НИА – Природа и РЭФИА, 2001. 576 с.
12. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2005 г.». М.: Министерство природных ресурсов РФ, 2006.
13. Шварц Е. Лесной кодекс: невыполненные обещания и упущенные возможности // Устойчивое лесопользование. 2006. № 4 (12). С. 2-7.
14. Шапарев Н.Я. Наш великий сосед Китай. Красноярск: РИО КГПУ, 2006. 163 с.
15. Иванов О.П. Государственное управление природными ресурсами. Новосибирск: СибАГС, 2007. 480 с.

Разработка дополнительных биоинформационных критериев экологического мониторинга в крупных промышленных центрах

А.В. Шабалдин, Л.А. Глебова, Е.Л. Счастливцев, А.А. Быков

Институт вычислительных технологий СО РАН (кемеровский филиал), Кемерово

Известно, что г. Кемерово является крупным промышленным центром Кузбасса, в котором расположены объекты химической, энергетической, металлургической, угольной промышленности и стройиндустрии. Кроме того, сама по себе Кемеровская область является уникальным индустриальным регионом, где на небольшой площади сконцентрированы предприятия всех выше перечисленных отраслей экономики, и сохраняется высокая плотность населения [5]. С этих позиций Кузнецкий угольный бассейн является уникальным естественным полигоном, позволяющим детально изучать взаимосвязь между выбросами индустриальных поллютантов и здоровьем народонаселения.

Известно, что демографические изменения в популяции связаны с репродукцией, с эффективностью воспроизведения новых поколений. Перепись населения, проведенная в 2010 году, показала продолжающейся демографический спад и низкий, по отношению к смертности, уровень рождаемости [7], также сохраняется рост репродуктивных потерь (привычного невынашивания беременности, врожденных пороков развития плода), как в целом по России, так и в частности по Кузбассу [12]. На репродукцию влияют ксенобиотики, образующиеся при добыче и переработке угля, за счет мимикрии со стероидными половыми гормонами человека. Кроме того, в эмбрио-фетальный период онтогенеза появляется высокая чувствительность плода (эмбриона) к негативному воздействию средовых и антропогенных факторов [13]. Поэтому врожденные пороки развития плода (ВПП) могут быть использованы, как дополнительные индикаторные биомаркеры, при мониторинге загрязнения окружающей среды индустриальными поллютантами.

На сегодняшний момент мониторинг степени загрязнения окружающей среды проводится по концентрации промышленных ксенобиотиков в атмосферном воздухе, воде и почве [10]. Критерии чистоты атмосферы лимитируются предельно допустимыми концентрациями (ПДК) для населенных мест, которые подразделяются на среднесуточные (ПДКс – длительных периодов воздействия) и максимально-разовые (ПДКр – 20-ти минутного осреднения) [8, 9]. Было показано, что этих показателей недостаточно для полноценного экологического мониторинга [1, 2].

Целью настоящей работы было исследование взаимосвязи между степенью антропогенного загрязнения атмосферного воздуха индустриальными поллютантами и частотой выявления врожденных пороков развития плода, а также оценки включения среднегодовых показателей уровней врожденных пороков развития плода в экологический мониторинг.

Международным Экономическим Сообществом была учреждена организация EUROCAT, основной задачей которой была создание регионального регистра пороков развития плода с высокой степенью летальности и с видимыми внешними дефектами, такие пороки получили название «модельные ВПП» [13]. На первом этапе проанализировали осредненную частоту (за 10 лет – с 2001 по 2010 гг.) встречаемости модельных ВПП по г. Кемерово (рис. 1).

Как видно из рисунка ведущими дефектами развития плода являются врожденные пороки сердца (ВПС), частота которых превышает 65 случаев на 1000 новорожденных детей, что в 3,7 раза выше общеевропейского показателя. Второе место в г. Кемерово занимает гипоспадия – 4 случая на 1000 новорожденных, но и эта частота в 11,9 раза превышает аналогичный показатель в Европейском регистре. Третье место занимают множественные пороки развития плода (МВПР), которые обнаруживались у 2 детей из 1000 родившихся, что в 1,5 раза выше европейских показателей. Остальные модельные пороки встречались с частотой ниже 1 ‰ и их частота была сопоставима с показателями Европейского регистра.

На следующем этапе изучили распределения частот модельных ВПП по административным районам г. Кемерово (рис. 2-4).

Из рис. 2 видно, что наибольшее число пиков модельных ВПП приходилось на Рудничный административный район г. Кемерово: полидактилия – 2,8‰; гидроцефалия – 1,9‰; гастрошизис – 0,9‰; синдром Дауна – 0,9‰; агенезия почки – 0,9‰. Для других административных районов г. Кемерово распределение частот ВПП носило дискретный характер.

Анализ распределения частот ВПС по административным районам г. Кемерово (рисунок 3) показал, что данный порок наиболее часто встречался в Заводском районе – 117‰, а минимально – в Рудничном (23‰). Аналогичное исследование частоты выявления гипоспадии и МВПР показало, что пики этих пороков приходились на Кировский административный район г. Кемерово (7,9‰ и 3,9‰ соответственно). Вполне допустимо, что высокая частота встречаемости этих модельных ВПП в Заводском и Кировском районе обусловлено спецификой индустриальных поллютантов прибывающих в максимально разовых и/или постоянных высоких концентрациях. Для подтверждения данного предположения провели сравнение распределения частот ВПП по административным районам г. Кемерово и степень загрязненности их атмосферы.

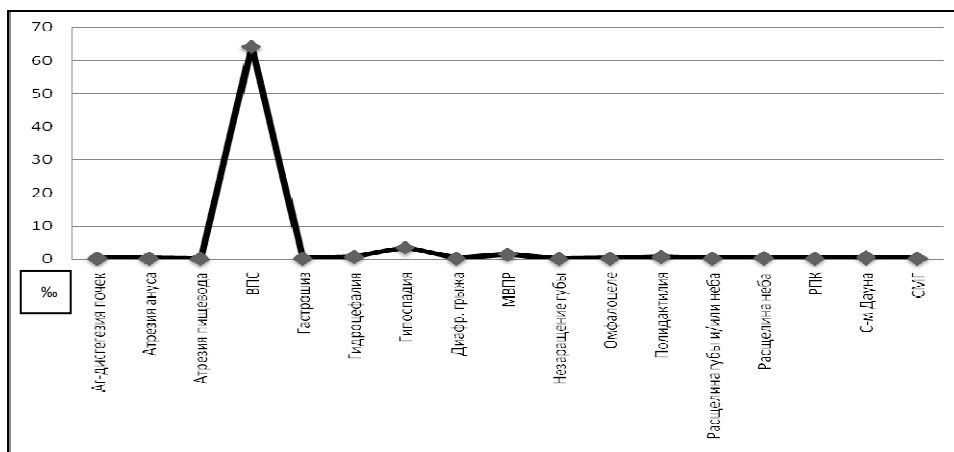


Рис. 1. Осредненная частота встречаемости модельных ВПП в г. Кемерово на 1000 новорожденных (ВПС – врожденные пороки сердца, МВПР – множественные врожденные пороки, РПК – редукционный порок конечностей, СМГ – спинномозговая грыжа).

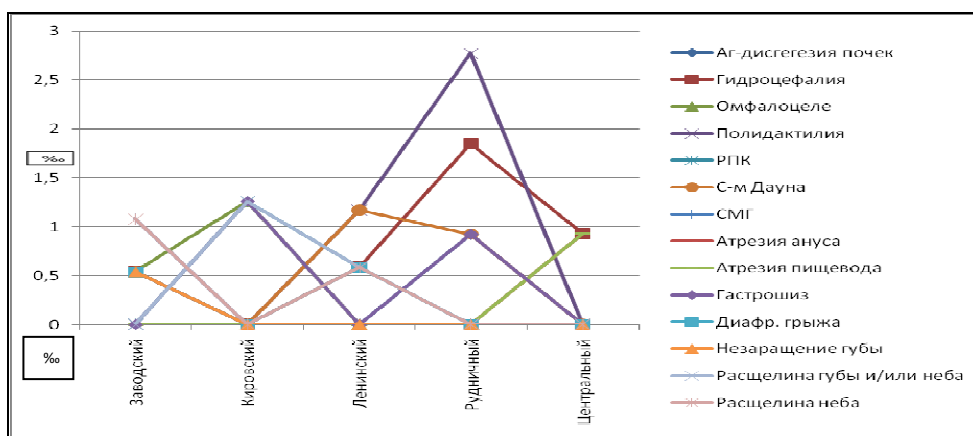


Рис. 2. Осредненная частота встречаемости модельных ВПП в различных административных районах г. Кемерово на 1000 новорожденных (РПК – редукционный порок конечностей, СМГ – спинномозговая грыжа).

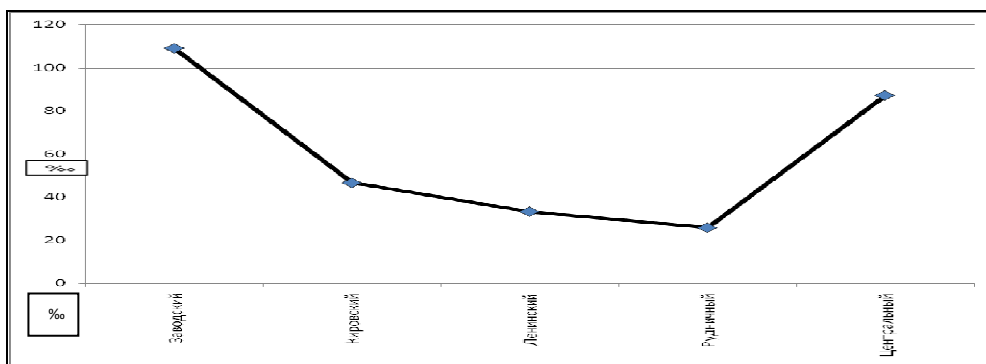


Рис. 3. Осредненная частота встречаемости врожденных пороков сердца в различных административных районах г. Кемерово на 1000 новорожденных.

Для сопоставления степени загрязненности атмосферного воздуха с показателями выявления отдельных нозологических форм ВПП в различных районах г. Кемерово и по годам вычисляли комплексный показатель загрязнения атмосферы (КПЗА), описанный в предшествующих работах [3, 4, 11].

$$КПЗА_p = \sum_i (C_{pi} / ПДК_{pi})^a, \quad (1)$$

где C_{pi} – приземная разовая концентрация i -го загрязняющего вещества в некоторой точке города, а $ПДК_{pi}$ – максимальная разовая ПДК этого вещества. Показатель степени a введен для приведения поллютантов всех классов опасности к единому третьему классу. Суммирование проводили по всем выбрасываемым в атмосферный воздух города веществам, для которых максимальная расчетная по [6] концентрация превышает значимый уровень.

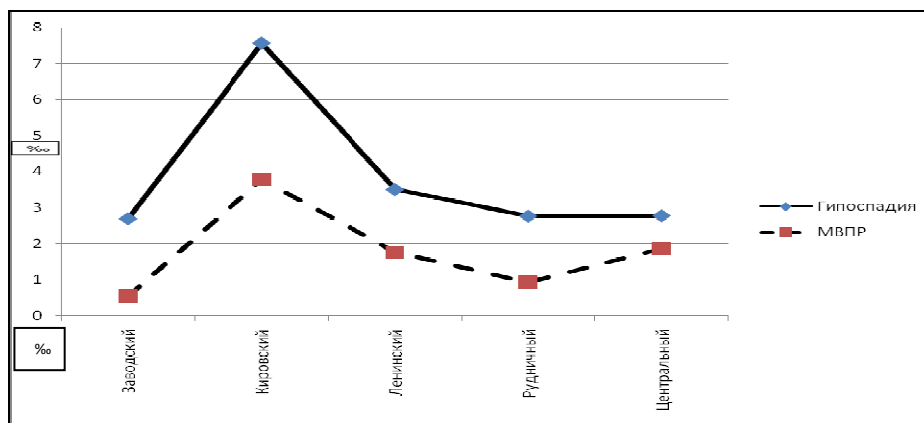


Рис. 4. Осредненная частота встречаемости врожденных пороков: гипоспадии и множественных врожденных пороков развития плода (МВПР) - в различных административных районах г. Кемерово на 1000 новорожденных.

В дополнение к (1) рассчитывали аналогичный показатель для годового осреднения:

$$КПЗАг = \sum_i (C_{gi} / ПДК_{ci})^a, \quad (2)$$

где C_{gi} – среднегодовая концентрация, а $ПДК_{ci}$ – соответствующая среднесуточная ПДК.

Показатели (1) и (2) не являлись нормативными гигиеническими критериями, поскольку далеко не все учтенные вещества обладают эффектом однонаправленного действия. Эти показатели носили смысл “суммарной техногенной нагрузки”, создаваемой промышленностью посредством атмосферного переноса загрязнения на ту или иную территорию города. Как тот, так и другой показатели, будучи вычисленными для различных точек города учитывают взаиморасположение промышленных и жилых районов. Однако при вычислении $КПЗАг$ не учитывается роза ветров, поскольку он базируется на максимальных разовых концентрациях, величина которых не зависит от того, насколько часто в ту или иную точку города переносятся выбросы предприятий. Показатель $КПЗАг$ зависит от среднегодовой концентрации и, следовательно, от характерного для города распределения направлений ветра (розы ветров), и тем самым отражает хроническое загрязнение атмосферного воздуха в том или ином административном районе г. Кемерово. В расчетах учтены источники загрязнения атмосферы промышленных предприятий и автотранспорта (3200 источников), выбрасывающих в атмосферу 185 загрязняющих веществ. Среди поллютантов присутствуют как основные (диоксид азота, сажа, сернистый ангидрид, оксид углерода, бенз(а)пирен, зола и т.д), источники которых рассредоточены по всему городу, так и специфические для г. Кемерово (нафталин, динил, нитробензол и т.д.), выбрасываемые единичными предприятиями.

Рис. 5 и 6 показывают границы изменения суммарной экологической нагрузки на атмосферу районов.

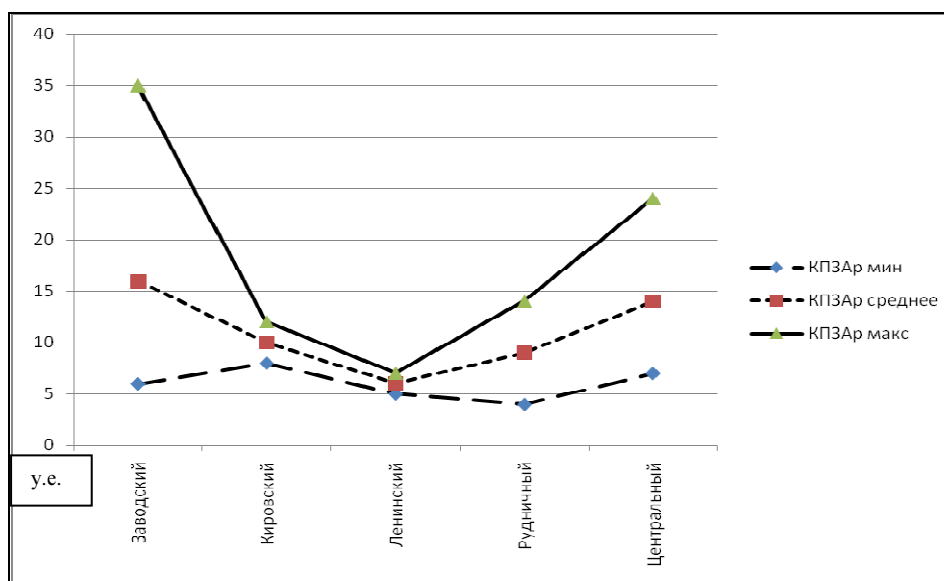


Рис. 5. Границы изменения и средние значения $КПЗАг$ (построен по расчетным разовым концентрациям [6]) для районов города Кемерово.

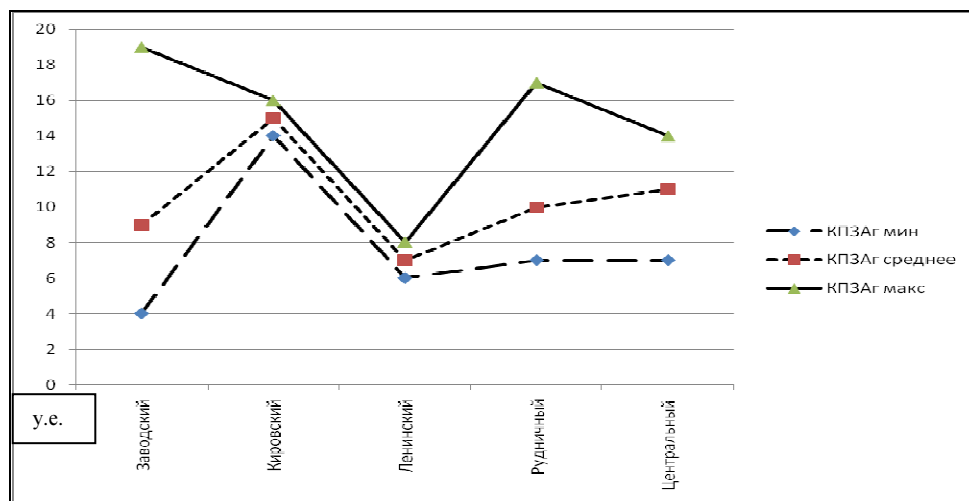


Рис. 6. Границы изменения и средние значения *КПЗАг* (построен по расчетным среднегодовым концентрациям) для районов г. Кемерово.

Большой разброс максимальных и минимальных значений *КПЗАр* и *КПЗАг* говорит о том, что загрязнение атмосферы отдельных территорий районов существенно отличается. Малый разброс означает, что почти все жилые зоны района имеют одинаковую антропогенную нагрузку на атмосферу.

В этом плане Ленинский район по тому и другому КПЗА практически всюду одинаково “чистый”, а Кировский – одинаково “грязный”.

Сравнение рис. 2-6 показало, что расчетные значения *КПЗАг* соответствовали показателям модельных ВПРП, выявляемых с большой частотой (ВПС и МВПР), по административным районам г. Кемерово, что и лежит в основе расчета рисков здоровью населения [8]. В частности, Заводской район по максимальному загрязнению (рис. 5) относится к лидерам среди районов. В этом же районе наиболее часто выявляются ВПС. Тем самым, пиковые выбросы поллютантов ассоциированы с формированием ВПС. Стабильное (незначительные различия между максимальными, минимальными и средними *КПЗАг*), в течении года, загрязнение Кировского административного района было ассоциировано с высокой частотой встречаемости МВПР и гипоспадии. Рудничный административный район г. Кемерово по показателям *КПЗАг* схож с Заводским административным районом г. Кемерово, но в этом районе максимальные разовые выбросы поллютантов (*КПЗАр* – максимальные) были намного ниже, чем в Заводском районе. Но в тоже время наличие длительных временных высоких концентраций поллютантов в этом районе проявилось пиками некоторых модельных ВПРП: полидактилии, гидроцефалии, гастрошизисе и синдроме Дауна.

Тем самым, на этом этапе работы было показано, что частота модельных ВПРП по административным районам г. Кемерово дополняет данные о загрязнении атмосферного воздуха различными индустриальными поллютантами информацией о характере компенсаторных реакций в человеческой популяции. Именно такого рода информации не хватает для полноценного экологического мониторинга.

Для подтверждения значимости ежегодного исследования частоты выявления модельных ВПРП в экологическом мониторинге, провели сравнение ежегодных частот выявления ВПРП (в период с 2005 по 2009 гг.) с уровнем загрязнения атмосферного воздуха различными индустриальными поллютантами и, в целом, с КПЗА (рис. 7-10).

Как видно из рис. 7, частота ВПС возрастала в период с 2007 по 2009 гг., показана статистически достоверная тенденция (7,01; $p < 0,001$) к увеличению этой эмбрио-фетальной патологии в ближайший период времени. Для других ведущих модельных ВПРП (гипоспадии и МВПР) выраженных положительных тенденций не обнаружено (для гипоспадии – (+) 0,03; а для МВПР – отрицательная тенденция – (-) 0,02).

На рис. 9 представлено распределение промышленных поллютантов в приземном слое воздуха по годам, а на рис. 10 показано комплексное загрязнение атмосферы в этот же временной период. Из всех представленных на рисунке веществ лишь бенз(а)пирен имел статистически значимую тенденцию к увеличению его концентрации в атмосфере в ближайший временной период (2,1; $p < 0,05$). Аналогичную тенденцию имел и показатель комплексного загрязнения атмосферы (1,6; $p < 0,05$).

Сравнивая рис. 7-10 можно отметить, что кривые роста ВПС по годам и концентрации в атмосферном воздухе бенз(а)пирена в этот же временной период – конгруэнтны. Так в 2006 г. для обеих кривых характерно некоторое понижение показателей, а с 2007 по 2009 гг. непрерывный их рост, с последующей положительной тенденцией.

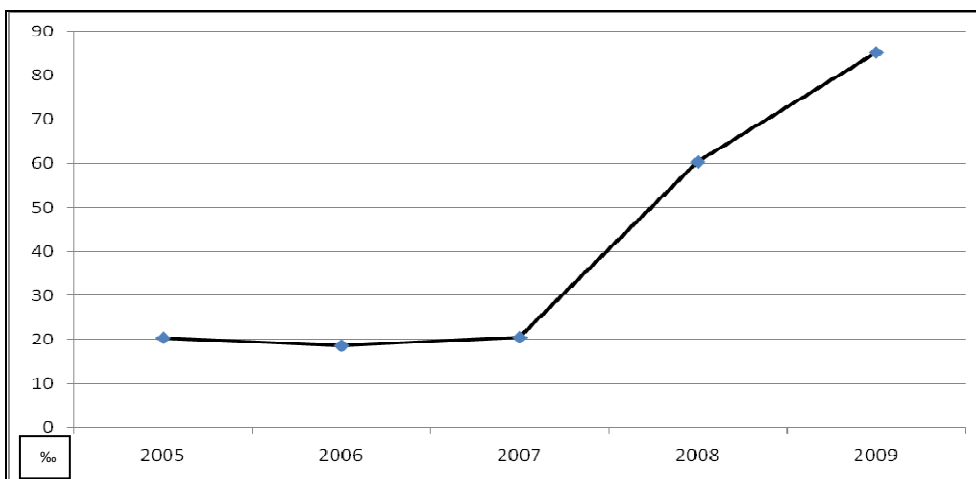


Рис. 7. Частота встречаемости врожденных пороков сердца (ВПС) по годам в г. Кемерово на 1000 новорожденных.

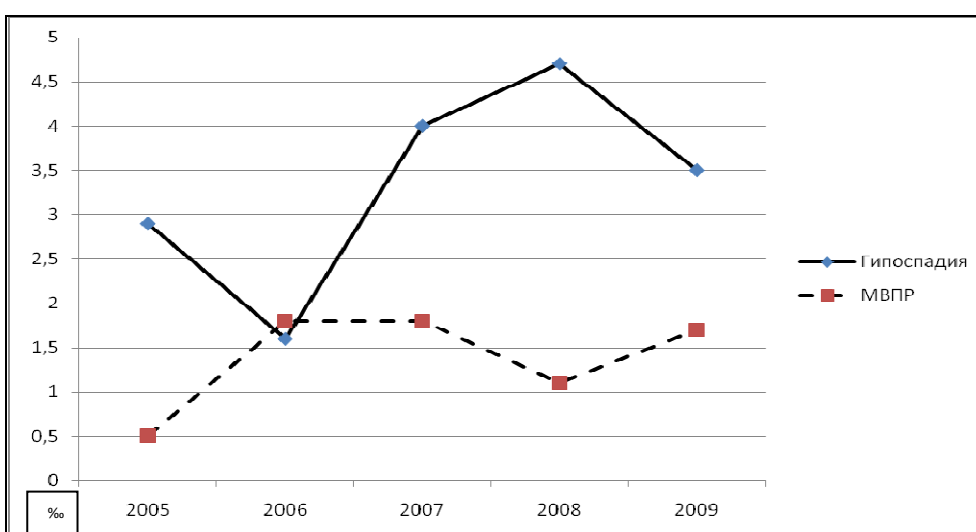


Рис. 8. Частота встречаемости ВПРП по годам в г. Кемерово на 1000 новорожденных.

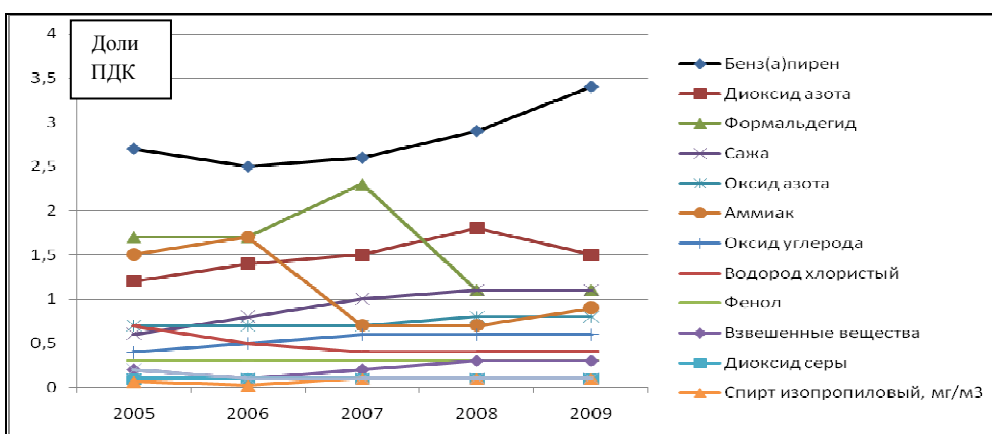


Рис. 9. ПДК промышленных загрязнителей в г. Кемерово по годам (5 летний период).

Анализ коррелятивной связи между этими двумя массивами показал достоверно значимую корреляцию ($0,96; p < 0,001$). Тем самым, можно говорить об ассоциации концентрации бенз(а)пирена в приземном слое воздуха и формированием ВПС в эмбрио-фетальный период онтогенеза. Вторая достоверная корреляция была получена при сравнении динамики КПЗА за период 2005 по 2009 годы и динамики МВПР за этот же период ($0,69; p < 0,05$). Других статистически значимых корреляций не обнаружено. Эти данные показывают взаимосвязь между комплексным загрязнением атмосферы и формированием в эмбрио-фетальный период онтогенеза множественных уродств у плода.

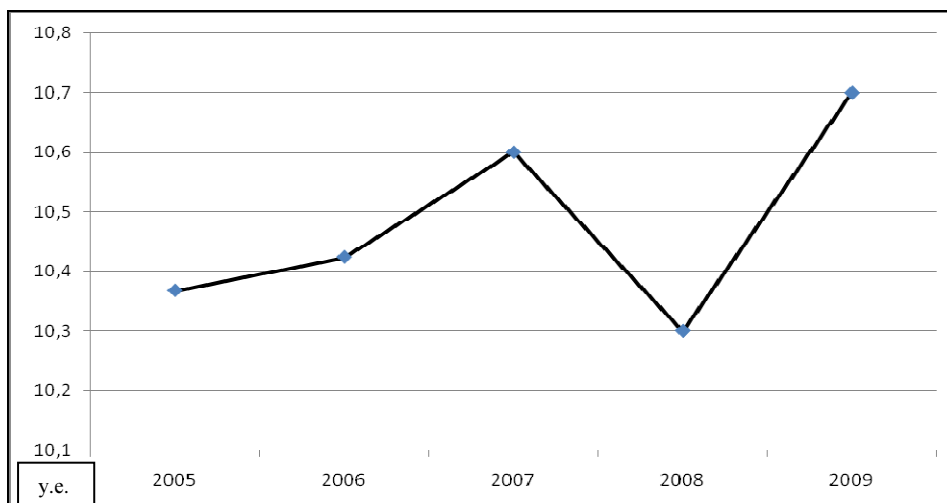


Рис. 10. КПА в г. Кемерово по годам (5 летний период).

В целом, приведенные результаты указывают на необходимость ежегодного учета частоты модельных ВПП, в частности ВПС и МВПР, для проведения экологического мониторинга в крупных промышленных центрах. Эти индикаторные биомаркеры позволят говорить об адаптации или дезадаптации популяции человека к изменяющимся антропогенным нагрузкам.

Литература

1. Быков А.А., Безруков П.А., Попенко К.Ю., Мокроусов В.В. Программный комплекс «ЭРА» // Экология производства. 2007. № 9. С. 80-83.
2. Быков А.А. Разработка и применение математических моделей для управления чистотой атмосферы по среднегодовым показателям. Автореферат канд. дисс. М.: Лаборатория мониторинга природной среды и климата Госкомгидромета и АН СССР, 1988. 22 с.
3. Зайцев В.И., Михайлуц Ф.П. Гигиеническая оценка загрязнения окружающей среды при многолетней эксплуатации сосредоточенных химических предприятий. Кемерово: Изд-во «Летопись», 2001. 192 с.
4. Здоровье населения и окружающая среда г. Кемерово / В.И. Зайцев (ред.) // Информационный сборник. Кемерово: Изд-во «Летопись», 2002. 214 с.
5. Материалы государственного доклада «О состоянии и охране окружающей среды в Кемеровской области» // Областной комитет природных ресурсов, 2011. www.ecokem.ru.
6. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 92 с.
7. Перепись населения 2010 // www.perepis-2010.ru.
8. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. 2.1.10.1920-04. М.: 2004. 163 с.
9. Рязанов В.А. О критериях и методах обоснования максимально допустимых концентраций атмосферных загрязнений в СССР // Предельно допустимые концентрации атмосферных загрязнений. Вып. 8. М.: Медицина, 1964. С. 5-21.
10. СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест». М., 2001.
11. Селегей Т.С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Новосибирск: Наука, 2005. 348 с.
12. Сидельников В.М. Невынашивание беременности. Руководство для практикующих врачей. Медицинское информационное агентство, 2010. 536 с.
13. Симонова Т.В., Глебова Л.А. Врожденные пороки развития в Кемеровской области (по итогам социально-гигиенического мониторинга). Информационно-аналитический обзор. ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Кемеровской области», 2010. 14 с.

Опыт использования математической модели распределения птиц в картографировании и мониторинге их ресурсов

В.А. Юдкин

Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск

Обобщение многочисленных результатов анализа обширного количественного материала по обилию птиц в разных эколого-географических условиях позволило выявить значимые для плотности вида внешние и внутренние факторы. Были подобраны функции, аппроксимирующие пространственные изменения плотности по этим факторам. Сопоставление этих результатов с фундаментальными положениями по экологии видов [1] была разработана концептуальная математическая модель пространственной неоднородности распределения птиц [2, 3]. Сущность этой модели следующая:

$$\ln N_{in} = \ln N_{int} - 0,78 \ln(0,0001m_i) + \ln b_{in} + 20(a_{in} - 0,6)^3 + \ln w + \ln k_{1...7}, \quad (1)$$

где N_{in} – плотность вида i в гнездовой период на участке n ; N_{int} – имманентная плотность вида i в год t ; m_i – средняя масса одной взрослой особи вида i (г); a_{in} – количество пригодного для вида i доступного субстрата на площади, занятой предпочитаемой топоархитектурой на участке n ; b_{in} – доля площади участка n с топоархитектурой, которую предпочитает вид i ; в число факторов $k_{1..z}$ включаются такие, как антропогенное беспокойство, влияние миграций на плотность населения, а также ряд индивидуальных, значимых лишь для определенных видов факторов; в данное уравнение на место $k_{1..z}$ обычно подставляются уже готовые произведения из множителей, нормированных по единице. Фрагмент w принимает значение верхнего или нижнего варианта уравнения (2), в зависимости от того, к северу или к югу от широтной зоны предпочтения расположен анализируемый участок:

$$w = \exp\left\{\left[-(x_{ci}c_{ni})^{rci} + (x_{di}d_{ni})^{rdi}\right]^{rsi}\right\} \text{ или } w = \exp\left\{-(x_{ci}c_{ni})^{rci} + (x_{di}d_{ni})^{rdi}\right\}, \quad (2)$$

где c_{ni} – отклонение широтно-климатических условий в выделе n от их интервала, предпочитаемого видом i ; d_{ni} – удаленность выдела n от долготного сектора предпочтения вида i ; коэффициенты x_{ci} и x_{di} и показатели степени r_{ci} и r_{di} принимают специфические для вида i значения в уравнениях, характеризующих изменение обилия по широтно-климатическому градиенту и по долготе соответственно [3].

Различные варианты графического решения этой системы уравнений подробно представлены в специальной монографии [3]. При этом наиболее информативным с точки зрения визуализации оказалось картографическое представление решения этой системы уравнений.

В системе уравнений (1) можно выделить 2 составляющие: крупномасштабную (экологическую) и мелкомасштабную (географическую). Первая представляет собой часть уравнения, моделирующего изменения плотности вида от внутренних и внешних факторов при незначимом влиянии географического положения. Его сущность представлена частью уравнения (1) без компоненты w и подробно изложена в специальной статье [4]. Эта часть модели отражает концептуальные представления о пространственной неоднородности распределения вида на пространстве, где широтно-климатическими и долготными закономерностями можно пренебречь. В частности, из этой части уравнения (1) видно, что обилие вида на определенном участке в какой-либо конкретный год определяется, с одной стороны, общей численностью подвида (или географической популяции) в данный год, а с другой стороны, величиной площади, пригодной для его обитания, ее емкостью и размещением в пространстве. Общая численность популяции определяется не только внешними, но и внутривидовыми факторами и может существенно различаться по годам. То, как отражается на плотности абсолютная численность популяции в определенный год, выражено через ее имманентную плотность в изучаемом районе (N_{int}). Величина пригодной для обитания площади на определенном участке и ее емкость в данном случае характеризуется параметрами a_{in} и b_{in} .

Эта часть концептуальной модели положена в основу функционирования специальной географической информационной системы, созданной для мониторинга орнитологической обстановки в зоне ответственности аэропорта, площадь которой невелика (1100 км²). Мониторинг орнитологической обстановки основан на создании ежегодной серии карт, отображающих численность самолетоопасных видов птиц и характер ее распределения в данной зоне [5]. Все карты строятся на базе единого деления картируемой территории на наименьшие единицы рассмотрения, то есть базовой картой является грид-карта. На ней в качестве наименьших единиц приняты градусные поля, каждая из сторон которых близка к 2 км. Отдельно для каждого такого градусного поля с использованием математической модели рассчитывается плотность каждого самолетоопасного вида для конкретного года. При этом количественная информация о проявлениях факторов, относящихся к группам a_{in} , и b_{in} в каждый конкретный год, считывается с материалов дистанционного зондирования Земли.

Для определения N_{int} (имманентной плотности) каждого из видов в данном районе в каждый конкретный год закладывается не менее 10 учетных трансектов. На этих трансектах проводятся выборочные учеты птиц. Учетные трансекты размещаются на картируемой территории таким образом,

чтобы представительно обследовать все разнообразие условий обитания изучаемых птиц. Величина N_{int} для прогнозных расчетов получена как средняя арифметическая этих величин на каждом учетном трансекте, где b_{in} составляет более 0,1, а a_{in} попадает в интервал 0,5-0,7.

В результате модельных расчетов для каждого вида получаем показатель плотности в каждом градусном поле. Таким образом, на векторной грид-карте объектами являются наименьшие единицы рассмотрения (градусные поля), а в атрибутивной таблице каждому виду соответствует колонка с количественной характеристикой его плотности. На этой основе строятся отдельные тематические карты распределения плотности каждого вида. Эта характеристика отображается способом картограммы. Легенда такой карты выполняется интервальным способом. Данная карта не только иллюстрирует характер пространственной неоднородности плотности вида, на ее основе можно корректно рассчитать величину численности на данной площади. Такие карты строятся для каждого временного среза, в результате чего получаются временные серии карт. На рис. 1 показана серия карт распределения *Corvus frugilegus*. Сравнение карт показало, что максимальная численность вида была в 2008 г., а после 2008 г. распределение несколько изменилось: заметно возросла плотность в северной части 15-километровой зоны.

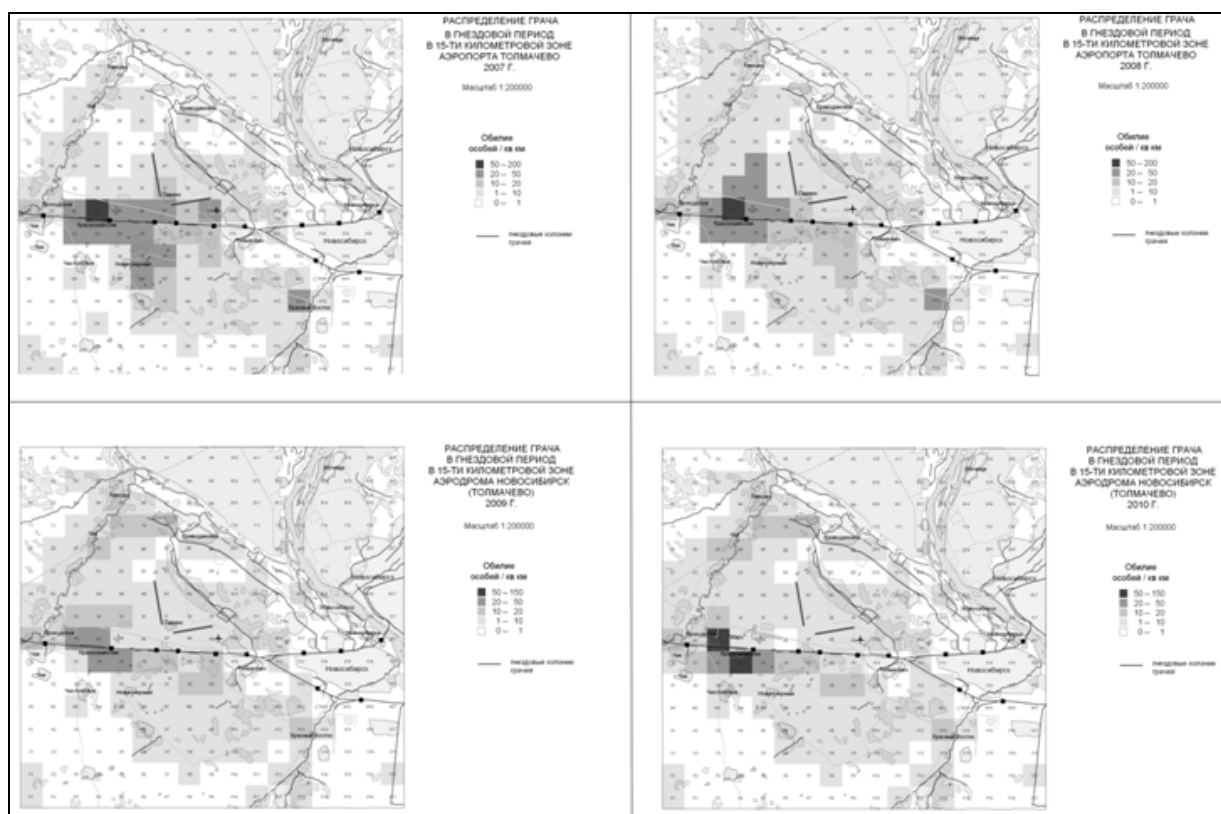


Рис. 1. Серия векторных крупномасштабных карт распределения *Corvus frugilegus* в различные годы в 15-километровой зоне аэропорта.

Оценка информативности этой части модели проводилась в рамках мониторинга в 15-ти километровой зоне аэропорта «Толмачево» в 2001, 2003 и в 2004 годах. Она выполнена путем сравнения модельных и эмпирических рядов показателей плотности. Для этого предварительно моделировались показатели гнездовой плотности в 11 выделах, в которых в последствие проводились выборочные учеты птиц. При моделировании расчет по данному уравнению проведен без участия множителя N_{int} , поскольку его величина бывает еще не определена до начала учетных работ. После проведения выборочных учетов оценено сходство модели с полученными результатами. Для такой оценки по каждому виду был рассчитан коэффициент корреляции модельных значений обилия и эмпирических. Средняя арифметическая коэффициентов корреляции для всех учетных видов на 11 маршрутах составила 0,65. Средняя взвешенная (чем выше сумма всех показателей обилия вида, тем больше вклад его коэффициента корреляции в среднюю) коэффициентов корреляции составила 0,81. При этом отчетливо просматривается тенденция: чем заметнее вид и чем он многочисленнее (а, следовательно, надежнее эмпирическая оценка его обилия), тем выше коэффициент корреляции. После приведения нормированных модельных коэффициентов к традиционной размерности обилия (умножением на имманентную плотность) они снимают 65,6% дисперсии показателей эмпирических значений.

Часть концептуальной модели, представленная системой уравнений (2), описывает основные географические закономерности распределения вида. Вариант картографического отображения

результата решения этой системы уравнений показан на рис. 2. Характеристика основных географических трендов плотностного потенциала вида, иллюстрируемая данной картограммой, получила название градиентного ареала. При отображении способом изолиний определенных уровней имманентной плотности установлено, что для каждого вида, входящего в тот таксон эколого-географической классификации, для которого строится модель, обнаруживается одна изолиния, наиболее близко располагающаяся на карте от границ его гнездового ареала в традиционных ареалогических представлениях (рис. 3). При этом замечено, чем выше численность вида, тем с меньшим значением плотности изолиния описывает его известный гнездовой ареал наиболее полно.

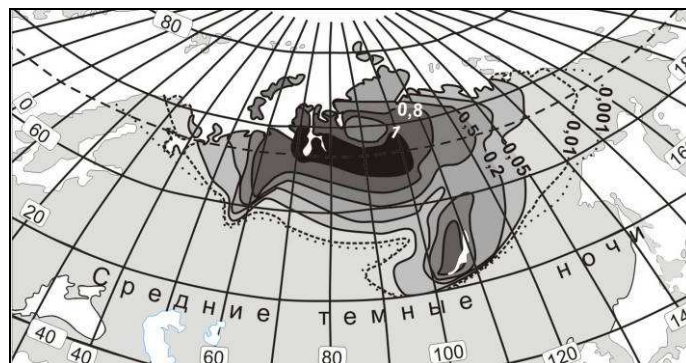


Рис. 2. Пример визуализации результата решения системы уравнений (2), график построен в географической системе координат.

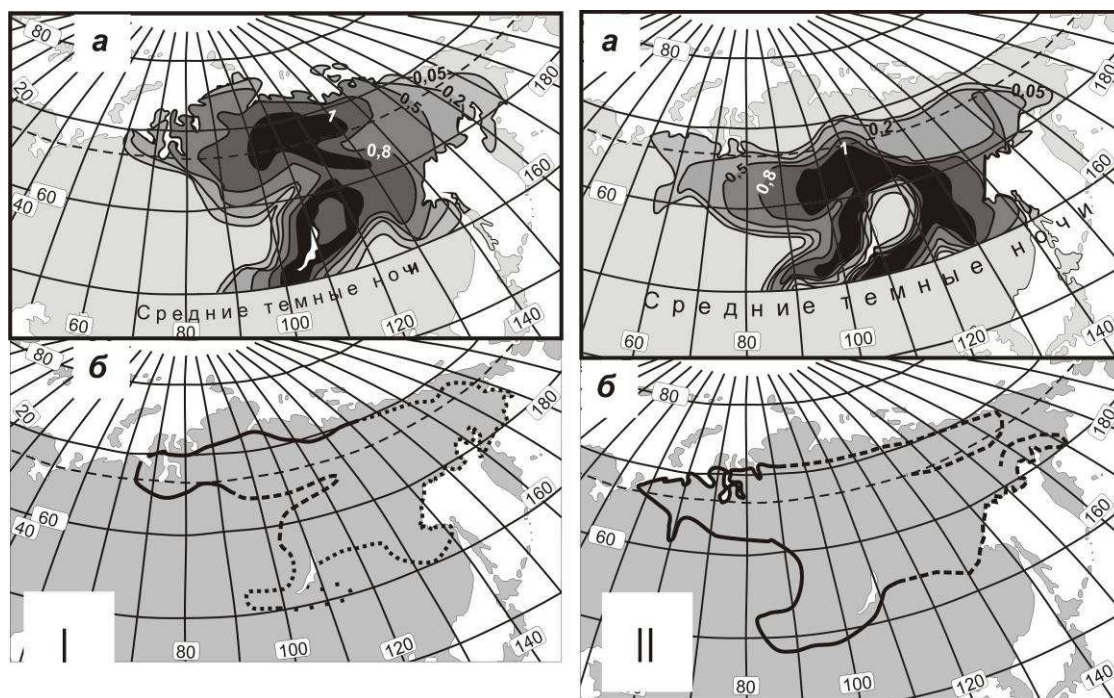


Рис. 3. Математико-картографическое моделирование границ гнездовых ареалов *Schoeniclus pallasi* (I); – *Gallinago stenura* (II) на основе системы уравнений (2) по изолинии 0,05 (а) и традиционные представления о гнездовом распространении этих видов (б).

Информативность моделирования границ ареалов оценивалась для каждого подвида (или вида) следующим образом. Из графической модели градиентного ареала отбирался контур, ограниченный той изолинией, при которой он наиболее близок к известным границам области гнездового распространения этого вида или подвида. Выбранная модельная область накладывалась на известную область гнездового распространения. Рассчитывалась площадь зоны совпадения этих двух областей. На основе этих данных посредством коэффициента общности Жаккара [6] рассчитывалась степень совпадения модельной и эмпирической областей распространения каждого подвида или вида. Средняя арифметическая всех коэффициентов общности составила $60,5 \pm 3,6\%$ (при 95% уровне значимости). Таким образом, данная математико-картографическая модель может быть весьма информативной и для описания традиционных представлений о гнездовом распространении птиц.

Сравнительно высокая информативность моделирования и наличие зависимости результатов не только от внешних факторов, но и от общей численности вида, позволяют смоделировать возможные

изменения границ гнездовых ареалов перелетных птиц. Исходя из концепции, на которой основана предлагаемая модель, наиболее существенными причинами таких изменений могут быть следующие: изменение общей численности вида (чаще всего из-за изменений емкости уже имеющихся зимовок), изменения положения зимовочных ареалов, глобальные изменения климата. Так, общее уменьшение численности вида (при прочих равных) должно в перспективе привести к постепенному сужению гнездового ареала, которое на карте будет проходить пропорционально пространственным градиентам имманентной плотности, отображенным градиентным ареалом (см. рис. 2 и 3). В наиболее простой форме, границы сужающегося ареала можно поэтапно обозначить последовательностью изолиний в порядке возрастания их значения плотности. На рис. 4 показаны 3 этапа возможного изменения ареала *Ocyris aureola* (вплоть до появления дизъюнкции), если современное уменьшение численности вида будет иметь долгосрочный характер. При увеличении численности, напротив, ареал вида в представлениях исследователей будет расширяться в обратном направлении: на каждом отдельном этапе расширения его границы могут быть описаны изолинией с меньшим, чем предыдущая, значением плотности.

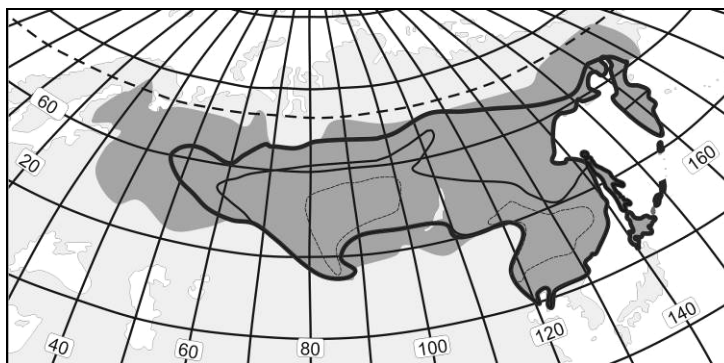


Рис. 4. Математико-картографическая модель возможных изменений в представлениях о гнездовом распространении *Ocyris aureola* в связи с общим долгосрочным сокращением его численности (три этапа изменений)

Изменения зимовочных ареалов приведут к изменениям долготных границ сектора предпочтения [7]. Соответственно в эту же сторону сместятся и изолинии с определенными значениями плотности. При этом масштабы такого смещения для каждого интервала долготы и широты будут уникальными из-за сложной конфигурации градиента широтно-климатических параметров.

Выше изложен опыт использования лишь отдельных фрагментов концептуальной модели для построения карт. Полностью вся модель задействовалась при составлении карт распределения семи охотничьих птиц на территории Западно-Сибирской равнины (*Anas platyrhynchos*, *A. acuta*, *A. querquedula*, *Clangula hyemalis*, *Lagopus lagopus*, *Lyrurus tetrix*, *Tetrastes bonasia*). Оптимальный масштаб этих карт составляет 1 : 10 000 000. Учитывая чрезвычайную сложность явления – пространственной неоднородности плотности вида – для его характеристики на карте отображаются 3 параметра: тип распределения, актуальная плотность вида и его плотностный потенциал. Для карты используются представления о распределении трех типов: сплошное, пятнистое и спорадичное [8]. Под сплошным понимается распределение, при котором вид обнаружится более, чем на трети участков, площадью 5 км², при условии случайного выбора таких участков в пределах изображенного на карте контура. Пятнистое распределение предполагает закономерное чередование таких по величине участков, заселенных видом, с 5-10 участками, где вид не обнаружится (также при случайном выборе таких участков в пределах обозначенных контуров). Спорадичное распределение характеризуется тем, что на подавляющей части площади вид, как правило, не встречается, но вероятность, хоть и незначительная, встретить отдельных особей или локальные группировки все же существует.

Первые два типа отображаются способом картограммы. Первый из этих типов на рис. 5 обозначен штриховкой с наклоном сверху вправо вниз, второй – с обратным наклоном. Приведенные для них плотностные характеристики, которые представлены в виде доверительных интервалов при 95% уровне значимости, являются результатом расчета по всем имеющимся эмпирическим данным, подпадающим под соответствующие типы распределения. Доверительный интервал в данном случае является и статистической характеристикой репрезентативности модельных значений плотности вида. Третий тип – спорадичное распределение, отображен способом качественного фона. Ему удобнее задавать белый цвет.

Основные пространственные тенденции плотностного потенциала вида обозначены способом изолиний. Числа, изображенные на линиях, означают возможность максимального обилия на самых благоприятных участках (независимо от типа распределения). Все количественные характеристики на картах приводятся из расчета на условный квадрат площадью 5 км². Количественные характеристики показанных контуров рассчитывались отдельно для каждой широтно-климатической зоны, ограниченной показанной изолинией. Для каждой такой зоны рассчитывался свой доверительный интервал плотности.

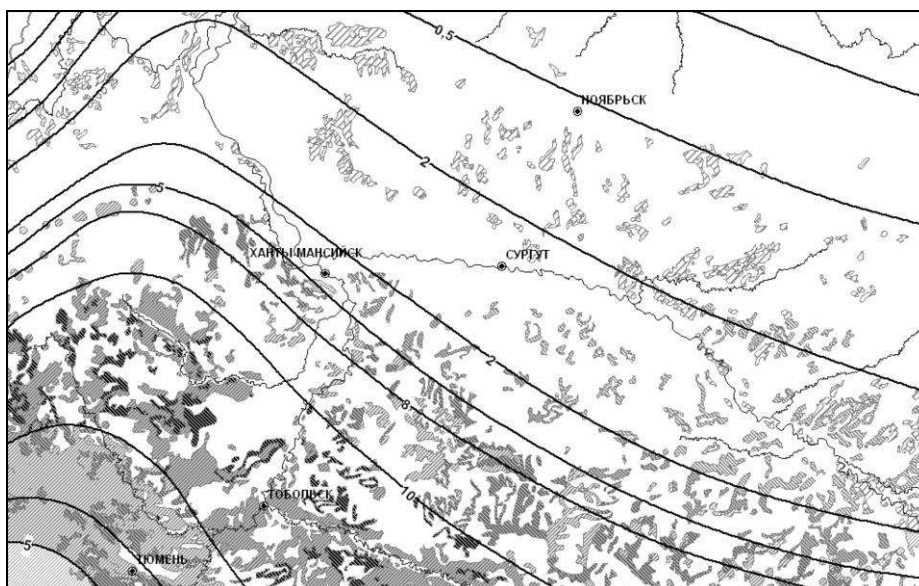


Рис. 5. Фрагмент мелкомасштабной карты «Гнездовая плотность *Lyrurus tetrix* на Западно-Сибирской Равнине».

Информация о проявлении экологических крупномасштабных факторов (параметрах a_{in} , и b_{in} уравнения (1)) считывалась с космических снимков. Эта информация синтезировалась из данных, полученных по отдельным спектральным каналам, снимкам, сделанным в разные фенологические периоды и с разным разрешением. В частности, информация о двух из наиболее значимых факторов – увлажненности и обводненности – получена со снимков разрешения 250 м, сделанных в июле по каналу 0,7–0,9 мкм (Terra-Modis). Данные о лесопокрытой площади, о характере сочетания участков, занятых древостоями, с открытыми пространствами, а также о значительных площадях с обширными тростниковыми займищами и зарослями кустарников, получены с космических снимков такого же разрешения, но сделанных в ноябре и декабре. Более детальный анализ отдельных участков Западно-Сибирской равнины выполнен по снимкам Landsat разрешением 10-15 м, снятым в те же фенологические периоды. Данные о проявлении широтно-климатического фактора заимствованы из Климатического атласа СССР [9].

Для каждого типа распределения внутри определенной широтно-климатической зоны на основе эмпирических выборочных данных рассчитаны показатели плотности. В качестве выборочных эмпирических данных использованы результаты учетов птиц, проведенных в 1020 территориальных выделах в разные годы в разных районах Равнины [10, 11].

Легенда этих карт представима в виде трех шкал. Первая, идеализированная, дается для характеристики плотностного потенциала. Две другие, для характеристики плотности при сплошном и пятнистом типах распределения. Интервалы этих двух шкал основаны на расчетах доверительных интервалов эмпирических данных, полученных на пространствах, подпадающих под характеристики данного типа распределения.

Оценка информативности данной математико-картографической модели выполнена с помощью прогноза плотности этих семи видов на 171 ранее обследованный выдел (эти эмпирические данные приведены в приложении монографии [3]). По каждому виду отдельно смоделированный ряд показателей плотности сопоставлялся с эмпирическим. Среднее значение коэффициентов корреляции составило $0,42 \pm 0,14$.

Литература

1. Hutchinson G.F. The niche: a abstractly inhibited hypervolume // The Ecological theatre and the Evolutionary play. New Haven, Conn.: Yale Univ. Press, 1965. P. 26-78.
2. Юдкин В.А. Организация пространственного распределения птиц в репродуктивный период. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал «Гео», 2000. 105 с.
3. Юдкин В.А. Экологические аспекты географии птиц Северной Евразии. Новосибирск: Наука, 2009. 408 с.
4. Юдкин В.А. Опыт математико-картографического моделирования распределения птиц // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, спецвыпуск 1. С. 153-167.
5. Юдкин В.А. Картографирование распределения птиц для мониторинга их ресурсов // Матер. VII науч. конф. «Картографическое и геоинформационное обеспечение управления региональным развитием». Иркутск, 20-22 нояб. 2002 г. Иркут.: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2002. С. 261-265.
6. Jaccard P. Lois de distribution florale dans la zone alpine // Bull. Soc. Vaund. Sci. Nat. 1902. Vol. 38. P. 69-130.

7. Юдкин В.А. Математико-картографическое моделирование временных изменений гнездового распространения птиц // Матер. IX науч. конф. «Тематическое картографирование для создания инфраструктур пространственных данных». Иркутск, 9-12 нояб. 2010 г. Ирк.: Изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2010. Т. 1. С. 76-79.
8. Пианка Э. Эволюционная экология: Пер. с англ. Гилярова А.М., Матвеева В.Ф. М.: Мир, 1981. 400 с.
9. Климатический атлас СССР. М.: ГУГК, 1960.
10. Карта «Население охотничьих птиц Западно-Сибирской равнины, принципы построения и общая характеристика» / В.А. Юдкин, Ю.С. Равкин, Л.Г. Вартапетов и др. // Тр. XII Междунар. орнитологической конф. Северной Евразии «Развитие современной орнитологии в Северной Евразии». Ставрополь, 31 янв. - 5 февр. 2006 г. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2006. С. 297-298.
11. Классификация позднелетнего населения охотничьих птиц Западно-Сибирской Равнины / В.А. Юдкин, Ю.С. Равкин, Л.Г. Вартапетов и др. // Матер. VIII Междунар. конф. «Природные условия, история и культура Западной Монголии и сопредельных регионов». Горно-Алтайск, 19-23 сент. 2007 г. Т. II. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2007. С. 231-235.

**ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА**

Информационное обеспечение задач мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли

О.Э. Якубайлик^{1,2}, А.А. Гостева², М.Г. Ерунова³, А.А. Кадочников¹, А.Г. Матвеев², А.С. Пятаев², А.В. Токарев¹

¹ Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

² Сибирский федеральный университет, Красноярск

³ Красноярский государственный аграрный университет

Введение

Интенсивное развитие нефтедобывающей отрасли на севере Восточной Сибири неразрывно связано с всесторонней информационной поддержкой, начиная с планирования и обеспечения данными анализа и прогноза геологоразведочных работ, бурения и разработки месторождения, и заканчивая ликвидацией нефтегазовых объектов (НГО). Наравне с этим необходимо выполнять экологический мониторинг НГО, который включает в себя сбор актуальных данных о влиянии данного вида антропогенного вмешательства на окружающую природную среду, его негативных воздействиях и возможных последствиях в будущем.

В настоящее время на территории Красноярского края активно проходят геологоразведочные работы, направленные на изыскание новых нефтяных месторождений. Динамично развивается и набирает мощь Ванкорское месторождение, которое находится на севере края, на территории Таймырского Долгано-Ненецкого автономного округа. Существует большое количество уже разведанных нефтегазоносных месторождений, таких как Мессояхское, Пеляткинское, Северо-Соленинское, Южно-Соленинское, Юрубченское и другие, которые находятся на разных этапах развития.

С учетом удаленности нефтегазовых месторождений от краевого центра и от крупных населенных пунктов, труднодоступности территорий в связи с отсутствием соответствующих объектов инфраструктуры, таких как дороги и линии электропередач, актуальными являются задачи удаленного мониторинга таких территорий для получения своевременной, независимой информации о состоянии той или иной характеристики, связанной с нефте- и газо-разрабатываемой и добываемой деятельностью. Речь идет не только о характеристиках состояния окружающей природной среды, но и о наблюдении за созданием и развитием объектов инфраструктуры, а также поиском новых месторождений посредством тематического анализа спутниковых изображений.

Всесторонний удаленный мониторинг объектов нефтегазовой промышленности и разрабатываемых территорий позволяет оптимизировать временные и финансовые ресурсы, а также прогнозировать те или иные ситуации, своевременно принимать взвешенные решения, и сокращать риски аварийных ситуаций, таких, как утечка загрязняющих веществ.

Современные ГИС предоставляют огромный спектр инструментов, включающих в себя средства измерений, развитые средства топологического и пространственного анализа, а также инструменты для работы с внешними базами данных. Кроме того, ГИС обеспечивают работу с любыми отчетными материалами, данными дистанционного зондирования земли (аэрофотоснимки, космические снимки, данные сейсмического зондирования и так далее).

Начиная с 2008 г. в Сибирском федеральном университете, при поддержке Министерства природных ресурсов и лесной отрасли Красноярского края, ведутся исследования мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли (НГО) Красноярского края. Первоочередные работы были связаны с характеристикой и оценкой современного состояния компонентов окружающей природной среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края (первоочередных участках Большехетского, Юрубчено-Тохомского, Собино-Тэтеринского, Нижнеангарского районов и Таймырского Заполярья); техническим характеристикам объектов НГО, связанных с поиском, разведкой и добычей углеводородного сырья, а также объектов его транспортировки, переработки, хранения и реализации; оценке эффективности действующих систем производственного экологического мониторинга на объектах НГО, уровню подготовки этих объектов к предотвращению аварийных ситуаций и ликвидации их последствий; оценке потенциальных экологических рисков и прогнозу изменений природной среды в районах деятельности объектов НГО; комплексной оценке совокупного воздействия объектов НГО на компоненты природной среды; формированию цифровых карт природных комплексов и объектов, цифровых моделей местности разных масштабов, информационных баз данных.

Совокупность задач, связанных с информационным обеспечением рассматриваемого мониторинга, решается через создание и актуализацию «Геоинформационной системы мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края» (далее – ГИС НГО) [1,2].

Ее можно охарактеризовать как информационно-аналитическую систему, основанную на Интернет- и ГИС-технологиях, в которой предусматривается обработка больших объемов картографической

информации, применение эффективных методов анализа данных, визуализация статистических и аналитических данных, сильно изменяющихся в пространстве и времени, с использованием карт и их комбинаций и развитыми средствами доступа к данным [3,4].

Структура ГИС НГО

В настоящее время ГИС мониторинга состояния окружающей среды состоит из четырех основных функциональных модулей:

База данных состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО по результатам наземных наблюдений, по результатам дистанционных наблюдений, вспомогательные материалы мониторинга и системный модуль, включающий в себя средства информационного взаимодействия пользователей и административный раздел каталога (рис. 1).

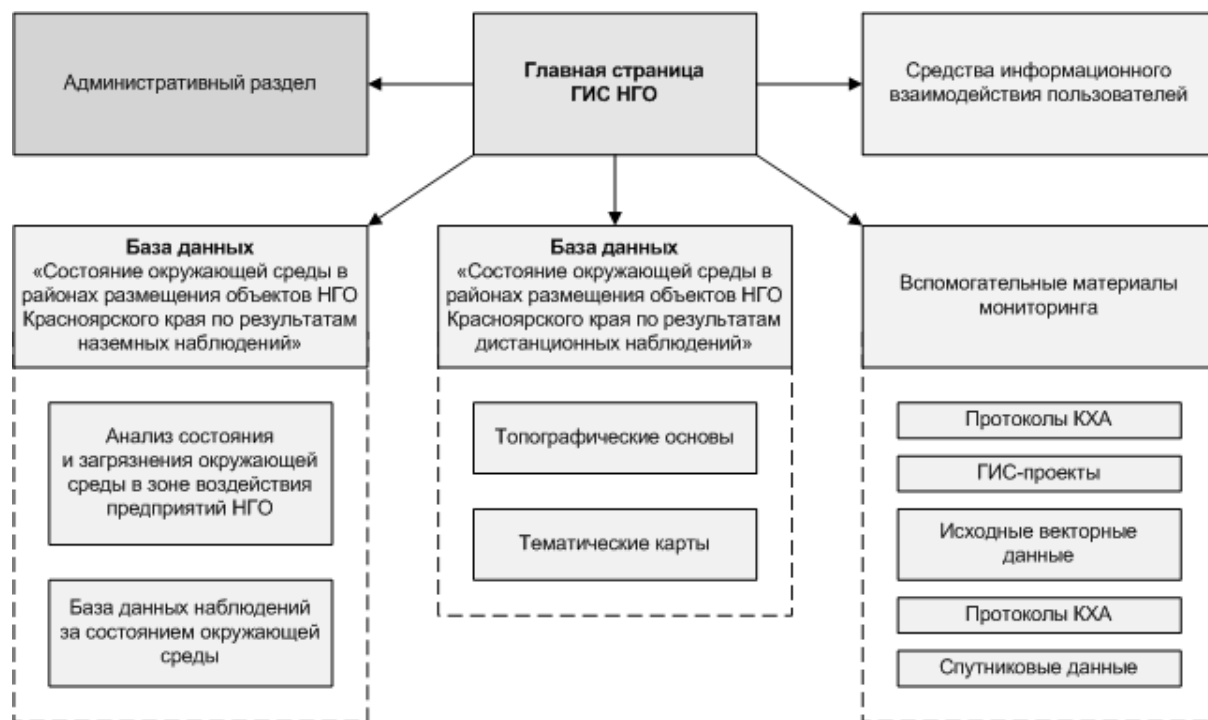


Рис. 1. Общая структура ГИС НГО.

Модуль «База данных состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам наземных наблюдений» содержит два раздела [5]:

- «База данных наблюдений за состоянием окружающей среды», где собраны результаты проведения КХА за 2008-2010 годы по отобранным пробам в районах размещения объектов НГО Красноярского края.
- «Анализ состояния и загрязнения окружающей среды в зоне воздействия предприятий НГО», где представлен инструмент для визуализации многомерных табличных данных результатов проведения КХА за 2008-2010 гг. по отобранным пробам в районах размещения объектов НГО Красноярского края, в виде столбчатых диаграмм. Данный инструмент позволяет сравнивать данные по различным этапам и участкам мониторинга, выявлять участки мониторинга, где наблюдаются превышение уровня ПДК.

Модуль «База данных «Состояние окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам дистанционных наблюдений» содержит два раздела [6]:

- Топографические основы, где содержатся топографические основы (масштаб 1:100 000 и 1:25 000) районов размещения объектов НГО Красноярского края за 2008-2010 годы (рис. 2).
- Тематические карты, где содержатся результаты дистанционных наблюдений за 2008-2010 годы по выявлению нарушений земель и растительности (вырубки леса, гари, изъятые под объекты НГО земли), и загрязнения природной среды (загрязнение поверхностных водных объектов и почвы, несанкционированные свалки отходов).

Модуль «Вспомогательные материалы мониторинга» содержит:

- Протоколы КХА.
- ГИС-проекты.
- Исходные векторные данные.
- Спутниковые данные.
- Отчетные материалы.

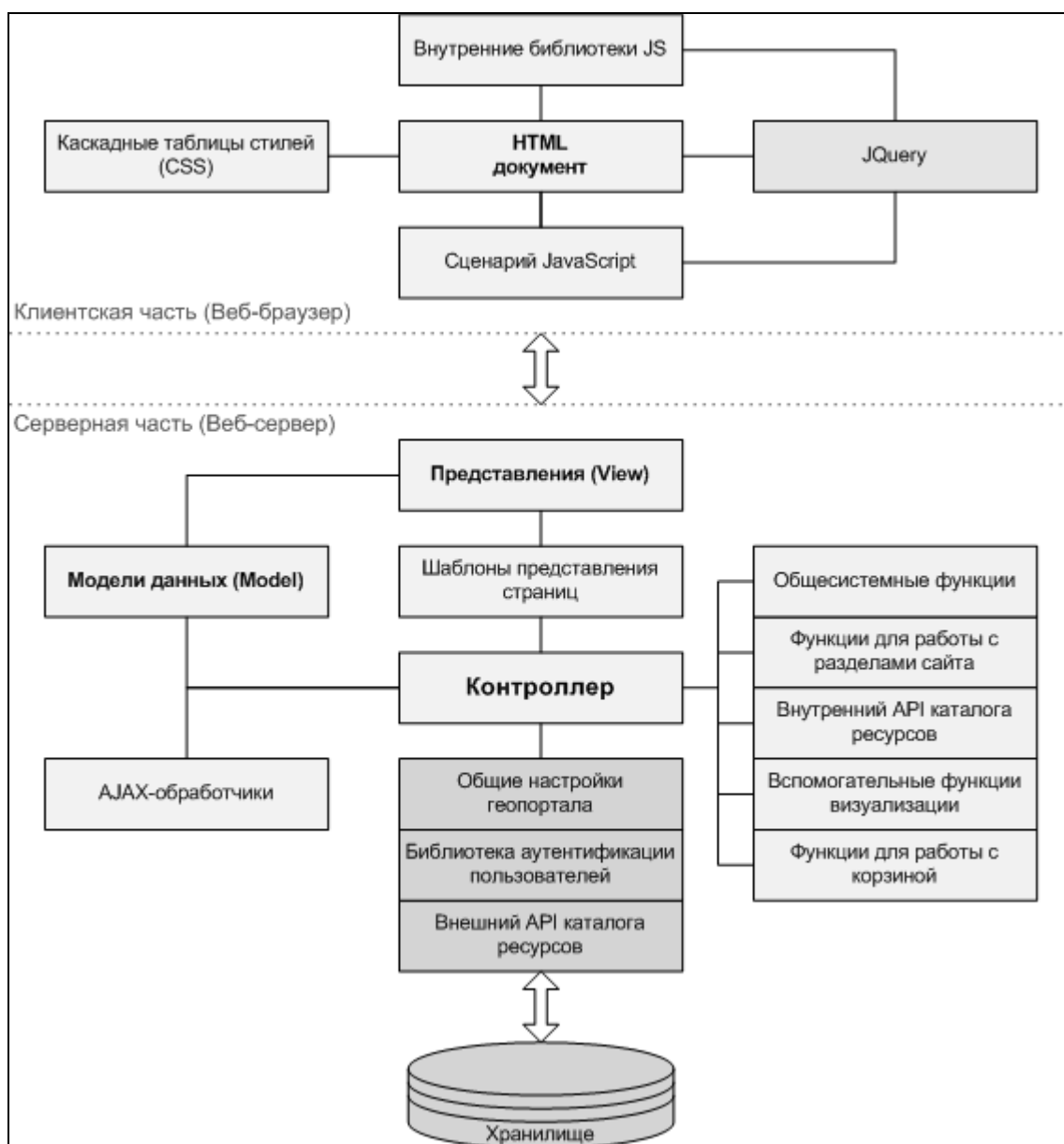


Рис. 2. Общая архитектура платформы клиентской части каталога «Исходные векторные данные».

Разработка клиентского веб-приложения «Исходные векторные данные»

С информационно-технологической точки зрения ГИС НГО можно рассматривать как информационно-аналитическую систему, геопортал – как средство доступа к распределенным сетевым ресурсам, данным мониторинга, пространственным данным, а также доступа к геосервисам, которые могут быть найдены на данном геопортале как исходной точке входа [7].

В качестве программной основы ГИС НГО используется геоинформационный Интернет-сервер, модульная архитектура которого позволяет развивать систему уже в процессе ее эксплуатации, путем добавления новых средств доступа к данным, а также совершенствования уже существующих средств [8].

На данный момент базовыми функциональными компонентами рассматриваемой системы являются:

- база данных характеристик объектов мониторинга;
- каталог информационных ресурсов;
- каталог пространственных метаданных;
- набор вспомогательных веб-сервисов;

Содержание каталога информационных ресурсов составляют объекты различных типов:

- структурные элементы (организация, сервер, папка);
- элементы системы безопасности (пользователь, роль);
- информационные ресурсы (картографический слой, карта, атрибутивные данные, аналитический сервис с веб-доступом, публикация, и др.);
- элементы классификации информационных ресурсов;

- информационно-навигационные элементы (HTML документы).

Каталог пространственных метаданных является подмножеством каталога ресурсов, упорядоченное определенным образом, содержащим метаописания всех картографических ресурсов ГИС НГО.

Созданные на основе этих компонентов клиентские веб- и windows-приложения предназначены для осуществления различных операций, таких как аналитическая обработка данных мониторинга, наполнение каталога информационными ресурсами, редактирование метаданных этих ресурсов, визуализация картографической информации, поиск и классификация картографических ресурсов, доступ к данным ресурсам посредством WMS-протокола и так далее.

Для организации пользовательского доступа к многочисленным ресурсам исходных векторных данных, хранящихся в каталоге ресурсов ГИС НГО, было разработано клиентское веб-приложение «Исходные векторные данные», предназначенное для отображения, поиска и фильтрации картографических ресурсов и их метаданных. Спроектированный пользовательский интерфейс системы стал результатом исследования ведущих зарубежных каталогов геопространственных данных, а также популярных тематических каталогов и поисковых систем сети Интернет.

Для реализации клиентской части каталога исходных векторных данных был создан программный каркас, целью создания которого послужила потребность в достаточно гибкой основе для создания Интернет-сайта. Существующие на тот момент популярные свободные системы управления содержимым, такие как Joomla, Drupal, Wordpress, безусловно, являлись (и являются до сих пор) лидирующими универсальными средствами разработки веб-сайтов, но функционал этих систем вполне можно было считать излишним для необходимых задач.

Основными требованиями при разработке платформы являлись: скорость, гибкость, расширяемость, простота установки, поддержка асинхронных запросов. При создании данного программного обеспечения использовались следующие языки и технологии программирования: PHP, XHTML, CSS, JavaScript, JQuery и AJAX.

Серверная часть разработанной программной системы, на основе которой создано веб-приложение «Исходные векторные данные», реализована с применением шаблона проектирования MVC (модель-представление-контроллер). Использование данной архитектуры предполагает разделение данных приложения, пользовательского интерфейса и управляющей логики на три отдельных компонента: модель, представление и контроллер – таким образом, что модификация каждого компонента может осуществляться независимо.

Разработанное приложение «Исходные векторные данные» в полной мере использует все преимущества фасетной (многоаспектной) классификации [4], лежащей в основе каталога пространственных метаданных, что существенно облегчает поиск картографических ресурсов.

Требования к исходным векторным данным

Для наполнения ГИС НГО пространственными данными разработан базовый набор правил (далее методика), регламентирующего порядок и способы предоставления цифровых картографических материалов (ЦКМ) всеми участниками проекта для последующей их публикации в сети Интернет [6]. Это позволит не только облегчить организацию информационного наполнения Интернет-сервера, но и будет способствовать повышению эффективности производства и использования всех публикуемых в рамках указанного проекта геопространственных данных.

Согласно разработанной методике приема ЦКМ следует провести специальную подготовку геоинформационных ресурсов, предназначенных для публикации на Интернет-портале.

- Требования к проекции. ЦКМ должны храниться в географических координатах (долгота/широта) или в картографической проекции с файлом-описанием (*.prj).
- Требования к формату данных. ЦКМ должны храниться в формате shape или TAB.
- Требования к структуре. К каждой карте должно прилагаться ее текстовое описание, которое содержит информацию о названии карты и ее назначение, указывается порядок следования слоев относительно друг друга (первый слой – верхний, последний – нижний).
- Смысловая однородность векторных слоев. Каждый векторный слой должен быть логически разделен по смыслу, т.е. нести информацию об одном типе данных (например, векторный слой гидрографии содержит только объекты речной сети, а векторный слой растительность содержит объекты растительного покрова и т.п.).
- Требования к метаданным. Каждый слой должен сопровождаться метаданными, включающими, как минимум:
 - имя файла;
 - полное наименование слоя;
 - актуальность информации на слое;
 - масштаб источника данных;
 - сведения о секретности (открытые, ДСП);
 - структура атрибутивной таблицы векторного слоя (заголовки столбцов, тип данных, расшифровка названия столбца и хранимой информации);

- объяснение способа измерения получения атрибутов или источники этих данных и способ кодирования атрибутов;
 - пояснение к цветовой легенде (значение цвета в RGB) карты и условным знакам (легенда);
 - сведения о дате, на которую информация актуальна;
 - сведения об источниках информации, методах ее получения;
 - пояснения к отсутствующим значениям в атрибутах – какой код отсутствия значений, что он означает (данный атрибут не имеет смысла для данного объекта, данное значение не было измерено или результат измерения был забракован, или измерения дали нулевой результат, т.е. значение ниже предела обнаружения);
 - другая информация по усмотрению исполнителя.
- Требования к атрибутивным данным. Для каждого векторного слоя должны быть организованы атрибутивные таблицы, количество столбцов таблице должно быть определено полнотой необходимых сведений характеризующих объект.
 - Требования к топологии. Цифровые картографические материалы должны быть полностью обеспечены топологической согласованностью объектов, что достигается тождественностью координат:
 - общей точки у примыкающих (пересекающихся) объектов;
 - границы для смежных площадных объектов (соседних) на отрезке примыкания;
 - осевой линии линейного объекта и границы площадного объекта на отрезке их примыкания.

Объекты не должны обрезаться по границам номенклатурного листа. Топология и атрибутивная информация объектов в векторных слоях должны быть сведены по всем выходящим на общую границу объектам. Векторная топологическая модель предусматривает использование в одном векторном слое данных одного типа, а именно – точка, линия, полигон.

Состав баз данных ГИС НГО

На текущий момент в Базе данных «Состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам дистанционных наблюдений» за 2008-2010 гг. представлено 52 картографических материала, разделенных на два раздела:

- *Топографические основы*, где содержатся более 30 топографических основ районов размещения объектов НГО Красноярского края за 2008-2010 гг. Все данные систематизированы по масштабам (1:100 000 и 1:25 000), каждый масштаб содержит результаты наблюдения систематизированные по годам (рис. 3).
- *Тематические карты*, где содержатся результаты дистанционных наблюдений за 2008-2010 гг. по выявлению нарушений земель и растительности (вырубки леса, гари, изъятые под объекты НГО земли), и загрязнения природной среды (загрязнение поверхностных водных объектов и почвы, несанкционированные свалки отходов) в соответствии с разделом «Топографические основы».

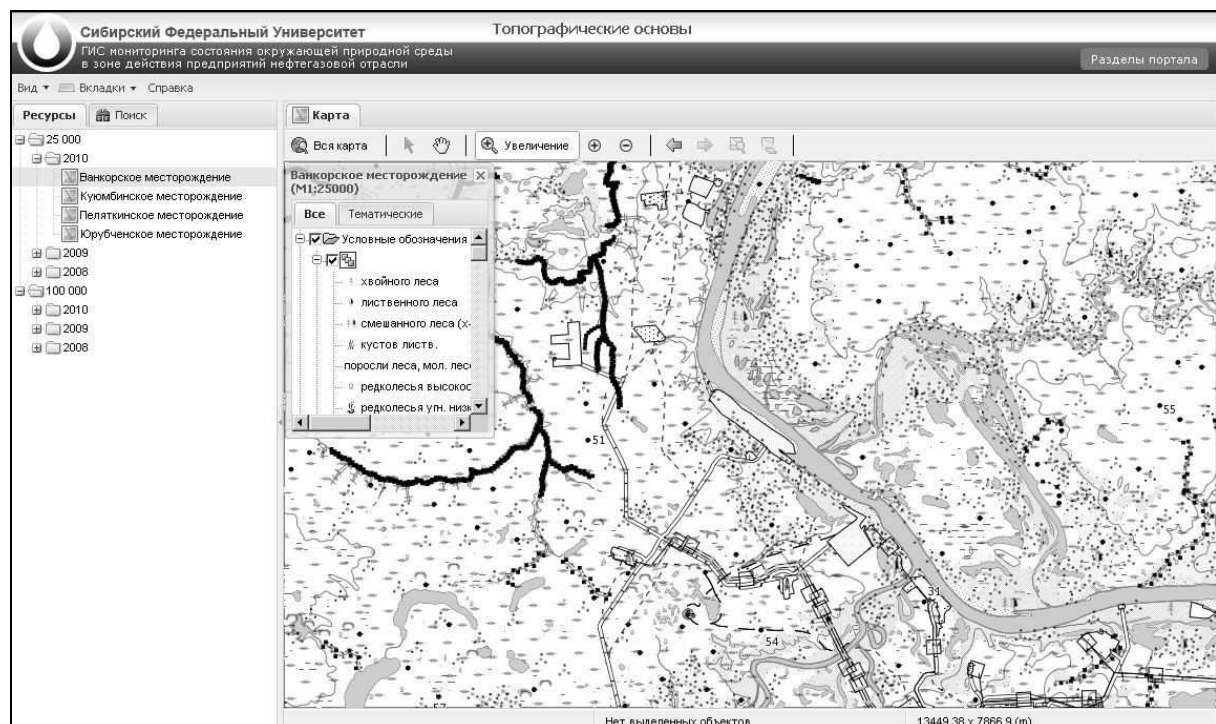


Рис. 3. Раздел «Топографическая основа» на примере Куюбинского месторождения.

В Базе данных «Состояния окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам наземных наблюдений» за 2008-2010 гг. содержит результаты проведения КХА по более 15000 отобраным пробам в зоне воздействия НГО.

В Базе данных «Исходные векторные данные» содержится около 1000 тематических слоев базы данных, собранной за 2008-2010 гг.

В разделе *Вспомогательные материалы* хранятся все протоколы КХА, которые сгруппированы по этапам проведения анализов, а так же отчеты за весь период исследования.

В заключение следует отметить, что в настоящее время продолжается работа по мониторингу состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края и в соответствии ведутся работы по развитию ГИС НГО. Перспективы развития проекта: разработка новых средств доступа к геопространственным данным, инструментов аналитической обработки данных мониторинга, средств визуализации исходных векторных данных и дальнейшее наполнение баз данных актуальными информационными ресурсами. Многие наработки, представленные в ГИС НГО, используются в Геоинформационном Интернет-портале ИВМ СО РАН (<http://gis.krasn.ru/>).

Литература

1. Якубайлик О.Э. Геоинформационная Интернет-система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Вестн, СибГАУ. 2010. Т. 1(27). С. 40-45.
2. Кадочников А.А. Проблемы реализации Интернет-банка пространственных данных мониторинга состояния окружающей природной среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отдельный выпуск № 18. С. 166-169.
3. Якубайлик О.Э. Геоинформационный интернет-портал // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, Вып. 3. С. 117-126.
4. Матвеев А.Г., Якубайлик О.Э. Классификация ресурсов и пользовательский интерфейс геоинформационного портала // Матер. 11 Всерос. научно-практ. конф. «Проблемы информатизации региона (ПИР-2009)». Красноярск, 2-3 нояб. 2009 г. Красноярск: РИЦ СибГТУ, 2009. С. 142-144.
5. Токарев А.В. Каталог ресурсов для ГИС мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Т. 18, № 12. С. 215-219.
6. Гостица А.А., Ерунова М.Г. Проект инфраструктуры пространственных данных ГИС-портала СО РАН // Матер. IX научн. конф. «Тематическое картографирование для создания инфраструктур пространственных данных». Иркутск, 9-12 нояб. 2010 г. Иркут.: изд-во Ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2010. Т. 1. С. 92-95.
7. Кошкарев А.В. Геопортал как инструмент управления пространственными данными и геосервисами // Пространственные данные. 2008. № 2. <http://gisa.ru/45968.html>
8. Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.А., Якубайлик О.Э. Формирование геоинформационного Интернет-портала для задач мониторинга состояния природной среды и ресурсов // Журн. Сиб. фед. ун-та. Сер.: Техника и технологии. 2008. Т. 1, № 4. С. 377-386.

Геоинформационный подход к адаптивному экологическому мониторингу в Алтае-Саянском экорегионе

Ю.П. Баденков¹, И.Н. Ротанова²

¹ УРАН Институт географии РАН, Москва

² Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Несмотря на активно развернувшиеся на рубеже XX-XXI столетий исследования в области охраны окружающей среды, в том числе изучение проблемы сохранения биологического разнообразия в условиях климатических изменений, остаются актуальными как фундаментальные научные вопросы в данной области знаний, так и прикладные (практические) стороны адаптации экосистем, а также формируются и новые аспекты, в числе которых: выявление особенностей влияния глобальных изменений на региональные экологические и социально-экологические системы, адаптивный экологический мониторинг (мониторинг «воздействий/реакции»), геоинформационные системы поддержки принятия решений в области природоохранной деятельности, адекватное управление процессами сохранения биоразнообразия и поиск моделей устойчивого развития для экологически уязвимых территорий, в том числе горных регионов.

Новые аспекты определяют смену концепций, расстановку приоритетов, специфику подходов, поиск механизмов, применение современных технологий, все шире используя информационные, в том числе, геоинформационные. В настоящее время геоинформационные технологии переходят из стадии, когда они служили лишь инструментом интеграции данных из различных источников и средством оперативного построения разнообразных карт к системам пространственного географического анализа и моделирования и далее к интерактивным средствам поддержки принятия управленческих решений на основе визуализации и углубленной аналитической обработки оперативной информации.

Новый подход к охране природы, получивший глубокое заинтересованное обсуждение среди представителей управленческих структур, природоохранных учреждений, научного сообщества, международных организаций, и одобренный для внедрения в Алтае-Саянском экорегионе (АСЭР), основан на положениях концепции непрерывного сохранения (*connectivity conservation*) биологического разнообразия, получившей реализацию на уже функционирующих «территориях непрерывного сохранения» в различных горных регионах мира, в числе которых: Йеллоустоун – Юкон эко-регион (США – Канада); Австралийские Альпы – Атертон; Сохранение биологического комплекса Бутан; Сакральные ландшафты Гималаев (Непал, Индия, Бутан); Малоти-Дракенсберг трансграничный регион (Южная Африка – Лесото), Alp-Arc Сеть охраняемых территорий европейских Альп; Центрально-американский биологический коридор. Площади, занимаемые «территориями непрерывного сохранения», исчисляются тысячами квадратных километров. Таким образом, на огромных территориях формируется гибкая и целостная система сохранения биологического и культурного разнообразия, объединенная общими целями и задачами и функционирующая на основе принципов партнерства (соучастия) основных заинтересованных сторон [9]. Процесс достижения и поддержки непрерывного сохранения неотъемлемо зависит от управления им. Управление – ключевое слово и ядро концепции непрерывного сохранения. Концепцией предусматривается адаптивное управление, когда желательное состояние объекта управления определяется на основе изучения его основных свойств, накопления опыта предшествующего процесса управления и необходимого изменения управляемого объекта в соответствии с уточненными целями в меняющихся условиях. Важным компонентом такого подхода к управлению является *адаптивный мониторинг*.

Вопрос системных наблюдений за происходящими изменениями в конкретных районах является ключевым в понимании тенденций развития и трансформации экосистем. Основной целью экологического мониторинга является постоянный анализ окружающей среды и прогнозирование возможных изменений в ней под воздействием различных факторов. Эффективность мониторинга процессов изменений всегда была предметом острых дискуссий и критики. В 2009 году известными учеными-экологами Линдермайером и Лайкензом была предложена концепция *адаптивного мониторинга* как новая парадигма для долгосрочных исследований [10]. Д. Линдермайер и Е. Лайкенз, основываясь на своем, более чем тридцатилетнем опыте экологических исследований и мониторинга в биосферном резервате Хаббард Брук, пришли к выводу о неэффективности многих программ по оценке состояния экосистем, их трансформации и устойчивому управлению ресурсами. Причинами этого были названы следующие:

- планирование долгосрочных исследований и мониторинга осуществляется по принципу – «собирай данные сегодня, думать будем позже»;
- результаты исследований и экспериментальные данные не попадают в сферу официальной статистики и не способствуют установлению трендов развития и изменений;
- структура долгосрочных исследований и программ мониторинга, построенная на отложенных выводах, не дает ответа на вопрос: Что измерять?

Учитывая решающее значение долгосрочных исследований и мониторинга в познании сущности экологических проблем, в управлении экосистемами и природными ресурсами, ими была предложена новая парадигма, которую они назвали *адаптивным мониторингом*. В основе парадигмы лежат:

- 1) легко поддающиеся обработке поставленные вопросы;
- 2) наличие строгой статистической структуры на самом начальном этапе;
- 3) наличие концептуальной модели изучаемой экосистемы (процесса);
- 4) потребность общества получить знания о происходящих изменениях.

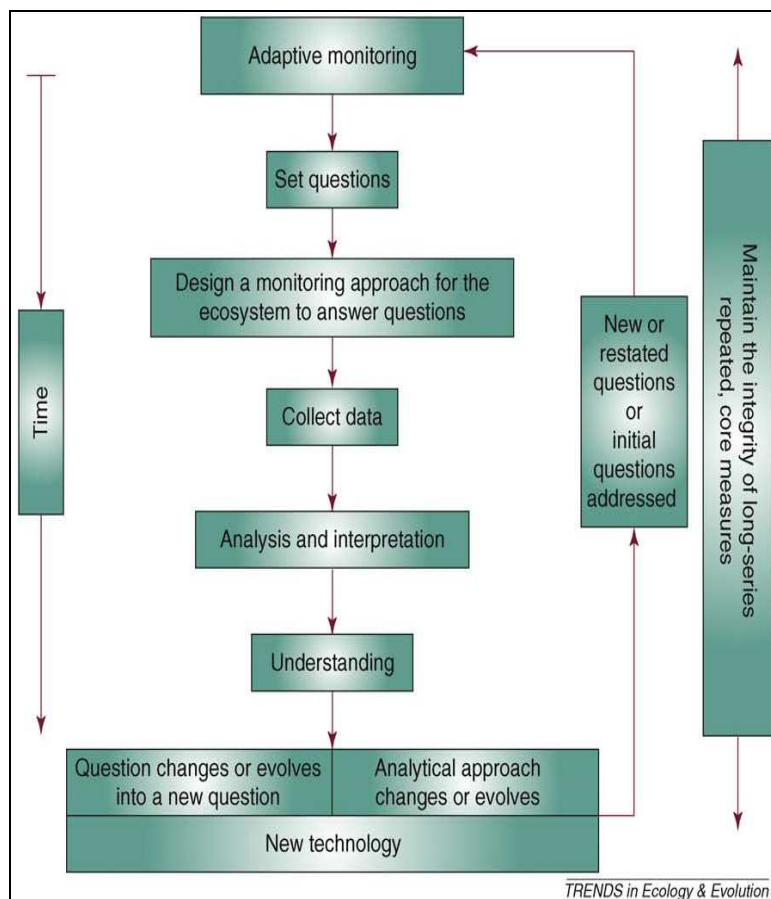


Схема адаптивного мониторинга (по [10]).

Как видно из схемы (см. рисунок), в основу *адаптивного мониторинга* положены «новые технологии», включающие как систему получения и первичной обработки данных (например, информационные сети интеллектуальных датчиков с возможностью анализа измеряемых параметров в масштабе реального времени, сенсоры и автономные портативные микропроцессорные регистраторы), так и геоинформационные системы для анализа и принятия управленческих решений, т.е. веб-ГИС-мониторинг.

Адаптивный экологический мониторинг служит одним из опорных элементов в *стратегиях адаптации* к глобальным изменениям, разрабатываемых в настоящее время для различных регионов, в том числе для АСЭР [9, 1]. *Стратегия адаптации* включает в себя научные оценки рисков, уязвимости и потенциальных выгод предполагаемых изменений, в первую очередь, климатических, с учетом природно-географических, экономических, социальных и иных особенностей конкретного региона или отрасли экономики.

АСЭР хорошо «вписывается» в концепцию *непрерывного сохранения* и концепцию *адаптивного мониторинга*. Вопрос о возможности включения АСЭР в существующую сеть регионов непрерывного сохранения обсуждался на совещаниях в Эквадоре (2006) и Непале (2008) [8]. Эта инициатива была поддержана Министерством природных ресурсов и экологии РФ и Республики Алтай, проектом ПРООН-ГЭФ, МСОП (IUCN WCPA), WWF России [3, 5].

АСЭР расположен в центре Евразийского континента, занимает огромную территорию – 1 065 000 кв. км, простираясь с запада (Алтай) на восток (Саяны) более чем на 1600 км и с севера (Салаир, Кузнецкий Алатау) на юг (Убсунурская котловина) на 1300 км. Это трансграничная территория: 62% расположено в Российской Федерации, 29% - в Монголии, 5% - в Казахстане и 4% - в Китае. Его ландшафтный покров весьма разнообразен и представлен альпийскими тундрами, горными лесами, степями и пустынями, причем, последние доминируют в Монголии и Китае.

АСЭР является внутриконтинентальным водоразделом между Северным ледовитым и Тихим океанами, а также внутренним бессточным бассейном Монголии. Отсюда берут начало такие реки как Обь и Енисей, входящие в десятку крупнейших рек мира. Их сток формируется за счет таяния ледников, которые занимают обширные пространства в Южном Алтае и Западных Саянах. На границе России и Казахстана находится самая высокая вершина северо-восточной Евразии – гора Белуха (4506 м).

АСЭР входит в список 200 важнейших (критических) экорегионов мира («Global-200»), выделенных Всемирным фондом дикой природы (WWF). Благодаря своему периферийному экономическому положению экосистемы региона сравнительно слабо изменены хозяйственной деятельностью и поэтому сохраняют уникальную возможность сохранения биоразнообразия. Эта уникальность подтверждается наличием двух объектов Всемирного природного наследия ЮНЕСКО в АСЭР – «Золотые горы Алтая» (Республика Алтай) и «Убсунурская котловина» (Республика Тува – Монголия).

В АСЭР существует развитая сеть особо охраняемых природных территорий (ООПТ), включающая в себя 20 федеральных ООПТ, около 50 региональных ООПТ и более 200 ООПТ более низких категорий (локальных). Имеется 5 биосферных резерватов (БР) ЮНЕСКО: четыре – на территории России и один – в монгольской части АСЭР.

«Флаговыми», находящимися под приоритетным контролем, видами в АСЭР являются снежный барс, алтайский горный баран, или аргали, соколон балобан. Считается, что снежный барс, занимая верхушку пищевой пирамиды высокогорий, является индикатором устойчивости и уровня биоразнообразия горных экосистем АСЭР [7]. Для «флаговых» видов разработаны программы мониторинга. Накоплен обширный фактический материал по их местообитанию и миграциям.

Биологическому и культурному разнообразию АСЭР в настоящее время угрожают факторы регионального и глобального и характера. Стратегии долгосрочного социально-экономического развития (Сибирь-2020, Казахстан 2030) включают в себя масштабные инфраструктурные проекты (например, трансграничный газопровод «Алтай» из Западной Сибири в Синьцзян (Китай), лесохозяйственные и горнорудные проекты, развитие индустрии массового туризма и т.д. Не меньшую угрозу представляют и глобальные климатические изменения, которые уже влияют на горного оледенение и многолетнемерзлые породы и, соответственно, на динамику речного стока, местные погодные условия и пожароопасность лесных экосистем.

В 1998 году стартовал международный проект WWF России «Обеспечение долгосрочного сохранения биоразнообразия Алтае-Саянского экорегиона» и немногим позднее одноименный проект, финансируемый Программой развития ООН и Глобальным экологическим фондом (ПРООН/ГЭФ). В процессе реализации проекта ПРООН/ГЭФ выполнено большое количество локальных проектов и накоплен впечатляющий опыт по различным аспектам охраны природы: создана интерактивная база данных по биоразнообразию всего АСЭР, в которую включено более 8 тысяч растений и животных; обобщен опыт традиционных знаний коренных народов по неистощительному использованию природных ресурсов; получает развитие опыт участия местного населения в управлении ООПТ, сеть которых укрепляется и расширяется. Были реализованы многие проекты по экологическому образованию и просвещению, по поиску дополнительных и альтернативных источников жизнеобеспечения сельского населения. В целом, в АСЭР создана солидная информационная и методическая основа для сохранения биологического разнообразия, а также разработаны механизмы передачи полномочий по охране редких видов в ведение региональных властей [4].

Материалы гидрометеорологических наблюдений последних лет подтверждают, что в АСЭР отмечается рост среднегодовой температуры, сезонных перепадов температур; наблюдаются изменения количества осадков, гидрологического режима, ландшафтной структуры и экосистем региона; происходит таяние многолетнемерзлых грунтов, отступление ледников, изменение положения границ высотных поясов, в том числе, границы леса, и, как следствие – изменение местообитаний животных [3, 5, 6]. Тренды и траектории климатических изменений показывают, что эти изменения будут продолжаться и на глобальном, и на региональном уровнях.

В 2010-2011 гг. в рамках Проекта ПРООН/ГЭФ/МКИ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтае-Саянского экорегиона» проведен анализ изменения климата и его воздействие на биоразнообразие, экосистемы, население и хозяйство. Результаты данного исследования показали чувствительность и уязвимость как природных экосистем, так и находящихся под угрозой исчезновения видов растений и животных, что инициировало разработку стратегии сохранения «флаговых» видов АСЭР, а также концепции стратегии адаптации российской части АСЭР к изменениям климата.

Опираясь на вышеизложенное, можно заключить, что *концепция непрерывного сохранения биологического и ландшафтного разнообразия в АСЭР может рассматриваться как новая парадигма управления, адаптированного к глобальным изменениям, что, несомненно, потребует построение адекватной системы мониторинга. Опыт природоохранных резерватов других стран и отечественная практика создания систем мониторинга в других сферах деятельности показывают, что такие системы в настоящее время невозможны без применения современных компьютерных технологий, т.е. должны строиться на основе базового ГИС-проекта, компьютерного картографирования, широкого использования данных дистанционного зондирования и интерактивных телекоммуникационных продуктов.*

В первые годы 21-го столетия в АСЭР уже имелся опыт создания ГИС. В конце 2010 года в рамках проекта ПРООН/ГЭФ «Сохранение биоразнообразия в российской части АСЭ» был объявлен конкурс на разработку информационной системы для организации результатов мониторинга изменений климата и экосистем в ООПТ АСЭР. В отличие от работ, выполненных ранее, разрабатываемая геоинформационная платформа предназначена для обеспечения *адаптивного экологического мониторинга* как компонента *концепции непрерывного сохранения биологического и ландшафтного разнообразия* в АСЭР и реализуется в формате веб-атласа (веб-ГИС-проекта). Специфика данной разработки связана с положением о том, что невозможно рассматривать отдельные ООПТ в качестве полностью изолированных объектов. Их следует рассматривать как кластеры (ключевые узлы) территории, в данном случае, *территории непрерывного сохранения*. Подобный подход определяет партнерский (корпоративный) характер и многоуровневность создаваемого веб-ГИС-проекта, т.е. использование обзорного, локального, объектного и других уровней с соответствующими масштабами и тематическим наполнением. Эти уровни связаны единым классификатором и «сквозными» объектами (в первую очередь, ООПТ и биосферными территориями). Унификация между разными уровнями ГИС и между объектами внутри уровней обеспечивается на основе единой схемы (модели) пространственных данных, единых легенд и стилей оформления карт.

Принципы построения веб-ГИС-проекта исходят из четырех вышеназванных положений, лежащих в основе парадигмы *адаптивного мониторинга*, исходя, в первую очередь, из потребности общества получить знания о происходящих изменениях. Потребностями общества определяются цели разработки веб-ГИС-проекта, которыми являются:

- систематизация данных адаптивного экологического мониторинга в АСЭР;
- информационная поддержка планирования и ведения природоохранной, научной, рекреационной и хозяйственной деятельности в АСЭР;
- информационное обеспечение органов управления для принятия решений;
- экологическое воспитание.

Целевые группы пользователей определяют концепцию построения и круг задач, решаемых в рамках веб-ГИС-проекта (веб-атласа), что вызывает необходимость проведения анализа геоинформационных потребностей АСЭР. Веб-атлас создается как партнерский (корпоративный) проект, т.е., многопользовательская геоинформационная система, основанная на общем и согласованном создании, доступе, управлении пространственными данными внутри и между пользователями для анализа и визуализации информации. Создаваемая партнерский веб-ГИС-проект включает данные многолетних наблюдений и статистические сведения, является масштабируемой системой, т.е., с возможностями введения в уже существующую структуру новых функциональных узлов. В структуру веб-атласа заложен блочный принцип, что позволяет модифицировать отдельные блоки, которые могут пополняться или расширяться, не изменяя структуры системы в целом.

Концепция создания веб-атласа АСЭР включает создание структурированного хранилища пространственных данных и поддержку ряда функций: сбор и хранение информации; структуризацию и описание объектов окружающей природной среды в соответствии с разработанной моделью и предметными областями (в том числе, ООПТ (как базовые объекты), другие природоохранные объекты, полигоны различных категорий (включая единицы районирования, зонирования и других делений территории), административно-территориальные единицы и пр.); обеспечение обмена данными; геоинформационно-картографическое моделирование; картографическую визуализацию и др. [2]. Проектирование пространственных баз данных — один из важнейших этапов, с которых начинается процесс создания партнерских (корпоративных) ГИС. Основой хранилища является клиент-серверная архитектура системы управления, но для каждой отдельной предметной области или для базовых объектов создаваемые базы данных обладают особенностями организации и хранения информации, в соответствии с территориальным охватом и тематическими направлениями адаптивного экологического мониторинга.

Основой ГИС является картографическая база данных, которая состоит из цифровой картографической основы (цифровых топографических карт различных масштабов) и цифровых карт, отражающих тематические сюжеты предметных областей. Статистическая и иная информация структурируется, локализуется и связывается с картографической основой посредством атрибутивной базы данных. Такой подход позволяет отобразить территориальные аспекты (признаки) обрабатываемой информации и использовать при дальнейшем анализе широкий спектр географических и картографических приемов и методов. Основные способы представления информации включают табличную визуализацию баз данных, интерактивные карты, графики, картодиаграммы, диаграммы и иные графические способы подачи информации.

Кроме этого, будет адаптирована технология доступа и работы с удаленными базами данных для различных пользователей, которая позволит пользоваться не только имеющимися и уже построенными картами и картограммами, но и формировать на основе запросов новые карты и аналитические материалы. Веб-ГИС-проект предполагает не только создание и презентацию карт, но и Интернет-использование, т.е., выполнение картометрического, морфометрического и математико-статистического

анализов, изучение структуры и взаимосвязей явлений, в том числе, исследование динамики явлений с использованием динамических последовательностей карт.

Архитектура веб-атласа строится на системе распределенного хранения и управления данными (сети узлов) с единым центральным геопорталом. Геопортал позволяет получить удаленный доступ к картографической и описательной информации партнерской ГИС, осуществлять редактирование и анализ хранящихся данных. Структурно веб-атлас проектируется состоящим из крупных тематических разделов, которые, в свою очередь, подразделяются на более мелкие компоненты (модули, блоки), включающие картографические, текстовые и иллюстративные материалы, последовательно раскрывающие особенности изучаемой проблемы или определяемые логикой и последовательностью отображения.

В работе используются программные средства фирмы ESRI и картографический сервер с открытым исходным кодом GeoServer. GeoServer реализован в виде веб-интерфейса и предоставляет пользователю возможность интерактивного создания и изменения разрабатываемого картографического ресурса.

В настоящее время в работе находится пилотная версия веб-ГИС-проекта, пространственно охватывающая российскую часть АСЭР. В качестве тестовых (базовых) объектов приняты три заповедника: Алтайский, Катунский и Убсунурская котловина. Пилотная версия предусматривает шесть тематических разделов:

- I. Портрет территории (природные, социально-экономические и демографические сведения, сеть ООПТ).
- II. Угрозы и риски (воздействия, нагрузки, ограничения).
- III. Критические экосистемы и ареалы (оценка уязвимости, зонирование, «горячие» точки).
- IV. Адаптация к воздействиям (воздействия, процессы – тренды и т.д.).
- V. Управление и соучастие.
- VI. Модельные объекты (ООПТ и биосферные территории - резерваты).

В числе «базовых» блоков базы данных пилотной версии следующие:

- блок «Сведения об АСЭР и БР/ООПТ» – набор данных, описывающих категорию, профиль, статус, площадь, дату создания, местоположение, ведомственную принадлежность ООПТ, площадь, местоположение АСЭР. ООПТ группируются по категориям и статусу. Набор сведений охватывает существующие, проектируемые и предлагаемые объекты ООПТ на территории АСЭР;
- блок «Природные ресурсы» – набор сведений по природным характеристикам. Описания группируются на уровне ландшафтных выделов;
- блок «Охрана природы» – списки объектов охраны, режимы природопользования, функциональное зонирование ООПТ;
- блок «Климат» – климатические показатели по метеостанциям в увязке с ближайшими БР/ООПТ;
- блок «Деятельность» – сведения о центрах экологического просвещения, базах экологического туризма, о работах и мероприятиях на ООПТ, включая участие в международных проектах;
- блок «Документы» – нормативно-правовые акты, систематизированные по рубрикам, выходные данные и тексты научных и технических отчетов, материалы проектов, фотодокументы;
- блок «Картографические материалы» – карты обзорного уровня (М 1:2 000 000 – 1:500 000) и карты локально-объектного уровня (М 1:100 000 – 1:25 000);
- блок «Справочники» – классификаторы формализованных данных, используемых в проекте другими блоками и разделами.

Для серии карт тестовых (модельных) ООПТ определены следующие основные тематические слои веб-ГИС-проекта:

- ситуационный план, отображающий местоположение ООПТ в АСЭР: границы ООПТ; границы буферной зоны; находящиеся в ее ведении кластеры; границы территории сотрудничества, или биосферного полигона (в российской трактовке); а также существующие и планируемые ООПТ на прилегающих землях, соседние землепользователи и др.;
- имеющаяся и планируемая инфраструктура ООПТ (кордоны, маршруты обходов и учетов, наблюдательные вышки, площадки мониторинга, туристические маршруты, экологические тропы, смотровые площадки, места отдыха, иные рекреационные объекты и др.) с привязкой к объектам существенной атрибутивной информации;
- территориальная структура ООПТ: внутреннее функциональное зонирование; структура землепользования (земли в пользовании ООПТ, земли пользователей в пределах буферной и транзитных зон в биосферных территориях или на внешней границе ООПТ);
- ландшафтная структура, контуры основных типов растительных сообществ (геоботаническая структура);
- места обитания ключевых, индикаторных и нуждающихся в особой охране видов растений и животных;
- основные типы площадных (пожары, распашка, применение ядохимикатов и т.д.) и точечных (факты браконьерства, незаконного проникновения на территорию и др.) нарушений;

- потенциальные угрозы (места наиболее вероятного возникновения пожаров и прихода палов извне, пути вероятного проникновения нарушителей и несанкционированного захода скота, возможные каналы попадания химических загрязнений извне и др.).

По всем слоям, где возможно, отражается количественная информация, а не только контурность.

В содержательном аспекте веб-атлас базируется на картографировании природной среды с позиции ландшафтного подхода и выявления факторов среды, а также антропогенных факторов, социально-экономических и других характеристик, объектов охраны природы и ООПТ, которые имеют ведущее значение при формировании тематических сюжетов карт. Картографический анализ основан на построении ситуационных, оценочных и прогнозных карт.

Текущий период создания веб-ГИС-проекта посвящен работе с картографическими данными обзорного и локально-объектного уровней. В список первоочередных карт включены: Физическая карта АСЭР, Карта водосборных бассейнов рек АСЭР, Ландшафтная карта АСЭР, Карта административно-территориального деления АСЭР, Карта численности и плотности населения АСЭР, Карта ООПТ АСЭР, серия карт базовых (модельных) биосферных территорий – заповедников Алтайский, Катунский и Убсунурская котловина.

Предусмотрено включение в веб-атлас систематизированной картографической информации, имеющейся в архивах ООПТ и создание на этой базе тематических слоев ГИС, позволяющих ее эффективное использование и анализ, в том числе: оцифровка ранее выполненных картографических материалов на бумажных носителях (геологической, геоморфологической, почвенной, гидрографической, зоологической и иных карт), карт и схем, иллюстрирующих различные виды деятельности и основные сведения о ее результатах, а также планируемые изменения на отдельных участках ООПТ (например, выделение целевых участков природоохранного управления – восстановления природных комплексов, историко-культурных объектов и др.), привязка имеющихся электронных карт и данных дистанционного зондирования, включая космосъемку.

Литература

1. Баденков Ю.П. Алтай-Саянский экорегион в контексте глобальных изменений: состояние и вопросы непрерывного сохранения биологического и культурного разнообразия // Матер. Междунар. сов. «Изменение климата и непрерывное сохранение биоразнообразия в Алтай-Саянском экорегионе». 23-27 июля 2010 г. Горно-Алтайск – Усть-Кокса – Барнаул, 2010. С. 132-160.
2. Баденков Ю.П., Ротанова И.Н. К вопросу о стратегии адаптации к климатическим изменениям в АСЭ, некоторые темы для обсуждения // Матер. научно-практич. сем. «Возможности адаптации к климатическим изменениям в Алтай-Саянском экорегионе». Барнаул, 31 мая - 3 июня 2011 г. Барнаул: Пять плюс, 2011. С. 85-95.
3. Матер. научно-практич. сем. «Возможности адаптации к климатическим изменениям в Алтай-Саянском экорегионе». Барнаул, 31 мая - 3 июня 2011 г. Барнаул: Пять плюс, 2011. 144 с.
4. Живое будущее Алтай-Саян. Информационный бюллетень проекта ПРООН/ГЭФ «Сохранение биоразнообразия в российской части Алтай-Саянского экорегиона». Красноярск, 2009. 39 с.
5. Матер. Междунар. сов. «Изменение климата и непрерывное сохранение биоразнообразия в Алтай-Саянском экорегионе». 23-27 июля 2010 г. Горно-Алтайск – Усть-Кокса.– Барнаул, 2010. 236 с.
6. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтай-Саянского экорегиона: оценочный доклад / Под ред. А.О. Кокорина; Всемирный фонд дикой природы (WWF России). М., 2011. 168 с.
7. Спицын С.В., Пальцын М.Ю., Истомов С.В. и др. Программа мониторинга снежного барса в Российской Федерации. Красноярск, 2009. 4 с.
8. Badenkov Yu. Paelearctic Connectivity Initiative. Altai Mountain Knot: Between conservation and development // Connectivity Conservation management: a global guide 2010. Earthscan. London – Washington, 2010. P. 245-250.
9. Connectivity Conservation management: a global guide. Earthscan. London – Washington, 2010. D.C. 382 p.
10. Linder Mayer D.B., Likens G.E. Adaptive monitoring: a new paradigm for long term research and monitoring // Trends in Ecology and Evolution. 2009. Vol. 24, N 9. P. 482-486.

Проблема извлечения из текстовых документов географических названий, отражающих содержание

В.Б. Барахнин, О.Л. Жижимов, Д.М. Скачков

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Введение

В настоящее время с учетом возрастающей потребности общества в информационном обеспечении, в том числе связанным и с географическим аспектом информации, все большую актуальность приобретают разработки, направленные на интеграцию «негеографических» информационных систем с информационными системами, изначально ориентированных на обработку географической информации. Добавление географического аспекта к информации, хранящейся в таких системах, как, например, электронные библиотеки, позволяет существенно повысить функциональность навигационных, поисковых и визуализационных сервисов этих систем, в частности, находить информацию, которая относится к конкретному географическому региону [3, 4].

Следует отметить, что существующие программные комплексы для организации электронных библиотек не обладают необходимой функциональностью по хранению и обработке географических данных. Наделение же их требуемой функциональностью осложняется отсутствием единых стандартов на поиск и представление данных, связанных с географическим аспектом, которые сопрягались бы с существующими геоинформационными системами (ГИС), т.е. с системами, для которых географический аспект информации является основным [5]. Отсюда вытекает актуальность и перспективность создания технологии, обеспечивающей обработку географической информации в «негеографических» информационных системах общего назначения.

Географический аспект информации может быть зафиксирован на уровне метаданных, описывающих содержание документа. При этом географические метаданные объекта могут быть заданы двумя способами:

- с помощью количественного геометрического описания географического объекта на основе координат;
- с помощью ссылки на элемент некоторого тезауруса, включающего географические названия соответствующих объектов.

Первый вариант более предпочтителен, но он не очень удобен по причине необходимости внесения существенных изменений в уже существующие информационные системы, в отличие от второго варианта, который может быть реализован на базе существующих парадигм информационных систем при условии их небольшой модернизации. Поэтому далее речь пойдет только о втором варианте.

Существует множество тезаурусов географических наименований, однако сложность их использования заключается в том, что географический аспект объектов, хранящиеся в электронных библиотеках, зачастую относится не к текущему, а к прошедшему моменту, в то время как большинство тезаурусов содержит информацию, относящуюся только к текущему моменту.

Важно подчеркнуть, что меняться могут не только географические названия, к чему мы все уже привыкли, но и границы геометрических объектов, которые соответствуют объектам географическим. При этом любые изменения географических названий и геометрических объектов, ассоциированных с ними, как правило, привязываются к какому-нибудь нормативному документу, будь то постановление того или иного органа власти или соответствующая историческая хроника.

Таким образом, для использования в информационных системах (в электронных библиотеках) географического аспекта в его любом виде необходим справочный аппарат (тезаурус), который бы включал в себя не только географический аспект информации, но и ее временной (исторический) аспект.

Основные требования к тезаурусу географических названий, который мог бы удовлетворить потребности существующих информационных систем по обработке географического и исторического аспектов информации, сформулированы в работах [7, 8]. Показано, что такого рода тезаурус должен являться расширением профиля ZThes [14] для доступа к тезаурусам по протоколам Z39.50 и SRW/SRU и включать необходимые компоненты для временного и географического поиска. Построена онтология тезауруса, отвечающего сформулированным требованиям. На основании этой онтологии и схемы тезауруса географических названий Института Гетти [12] построена схема тезауруса, подходящая для использования при внедрении в электронные библиотеки.

При содержательном наполнении тезауруса для геокодирования текстов, связанных с географическими объектами (населенные пункты, реки и т. д.), расположенными на территории Российской Федерации, целесообразно использовать Тезаурус географических названий Российской государственной библиотеки [6, 10]. К его достоинствам следует отнести полноту и наличие ссылок на нормативные документы, определяющие наименование объекта. Однако данный тезаурус нуждается в известной доработке. Во-первых, иерархические связи в нем явным образом не указаны и могут быть получены лишь путем обработки записей. Во-вторых, в нем не содержится ретроспективных сведений:

невозможно получить ни данных о предыдущих названиях, ни данных о предыдущих координатах объектов. Далее мы будем говорить о геокодировании документов на русском языке с использованием названий российских географических объектов.

Важнейшей задачей, возникающей в процессе добавления к описанию документа географических метаданных, является извлечение из его текста географических названий, входящих в тезаурус и отражающих содержание документа. Ввиду того, что электронные библиотеки нередко содержат десятки тысяч (а иногда и миллионы) документов, решение указанной задачи невозможно без ее максимальной автоматизации. Проблемам разработки алгоритмов автоматизированного извлечения из текста документа географических названий, отражающих его содержание, и посвящена данная статья.

Автоматизированное извлечение географических названий

Первым этапом решения поставленной задачи является извлечение из текста документа *всех* географических названий, входящих в тезаурус. Сразу оговоримся, что вхождение в текст документа притяжательного прилагательного, соответствующего тому или иному географическому названию (*новосибирский метрополитен, омский спортсмен* и т.п.), будет приравниваться к вхождению в текст самого географического названия. Разумеется, для большей точности работы алгоритма тезаурус следует дополнить синонимами официальных названий: например, *Санкт-Петербург – Петербург – Питер – северная столица – город на Неве* и т.д., а также их производными, но мы отдаем себе отчет в трудоемкости и слабой формализуемости решения этой задачи.

Итак, фактически, мы имеем дело с задачей координатного индексирования текста терминами, входящими в заданный словарь, при этом термины могут состоять не только из одного, но и из нескольких (как правило, двух) слов, например, *Новосибирская область, Белое море, Северная Двина* и т.п. Ввиду того, что в русском языке имена существительные и прилагательные при склонении изменяют свою форму, разработка эффективного алгоритма автоматизации извлечения из текста ключевых терминов, в том числе и географических названий, представляет нетривиальную задачу, ибо необходимо учитывать и те случаи, когда слова, образующие термин, находятся не только в именительном (как они занесены в тезаурус, за редкими исключениями типа *море Лаптевых*), но и в косвенных падежах.

В [11] описан алгоритм автоматического поиска и подсчета ключевых слов из заданного словаря, представляющих собой словосочетания сложной структуры, учитывающий морфологию русского языка. В основу алгоритма [1] положено использование двух индексов, содержащих триады

«номер текста» – «позиция в тексте» – «номер слова из лексического словаря»
и
«номер термина» – «позиция слова в термине» – «номер слова из лексического словаря».

При этом если первый индекс встречается практически во всех информационно-поисковых системах, то введение второго индекса, позволяющее резко повысить эффективность алгоритма, имеет оригинальный характер. Индекс терминов наряду с их списком размещается в хранилище данных программной библиотеки, реализующей алгоритм, и пополняется по мере изменения этого списка.

Кратко опишем указанный алгоритм.

I. Алгоритм построения индекса терминов состоит из следующих этапов:

1. Разбиение термина на отдельные слова.
2. Создание предварительного индекса, содержащего триады «номер термина» – «позиция слова в термине» – «слово в символьном представлении».
3. Добавление встретившихся неизвестных слов в лексический словарь библиотеки, где им присваиваются идентификационные номера.
4. Переработка индекса в формат «номер термина» – «позиция в тексте» – «номер слова из лексического словаря».
5. Сбор статистики о длинах терминов для реализации поиска и идентификации составных терминов (т.е. терминов, состоящих более чем из одного слова).
6. Сбор статистики о количестве вхождений отдельных слов в термины для оптимизации поиска путем исключения из рассмотрения терминов, заведомо отсутствующих в тексте.

II. Алгоритм построения индекса текстов аналогичен, но в нем отсутствует этап 3.

III. Заключительная стадия работы программной библиотеки – подсчет количества вхождений терминов в текст (тексты). Ее этапы:

1. Подсчет возможных комбинаций «текст» – «термин», основанный на статистике вхождения отдельных слов (см. этап 6 алгоритма индексации терминов).
2. Нахождение всех потенциально возможных мест вхождения каждого термина в текст (тексты) на основе наличия хотя бы одного общего слова из лексического словаря. Позиция каждого потенциально возможного вхождения фиксируется.
3. Рассмотрение каждого из возможных мест вхождений с точки зрения соответствия термину в целом.

4. Рассмотрение каждого из возможных мест вхождения с точки зрения соответствия термину в целом. Актуальность вхождения определяется наличием рядом с соответствующей позицией других слов, входящих в термин. Существуют конфигурируемые варианты требований определения актуальности вхождения (точный или неточный порядок слов, минимальное количество слов, входящих в термин, возможность «прерывания» термина посторонними словами и т. п.).
5. Исключение учета вхождений, поглощаемых более длинными вхождениями.
6. Сбор статистики вхождений для каждой пары «текст» – «термин».

Отметим, что при решении задачи извлечения географических названий этапы 4 и 5 актуальны довольно редко, но все-таки их нельзя полностью исключить: например, практически равноупотребительны термины *Новосибирский район* и *Новосибирский сельский район*, обозначающие один и тот же географический объект.

На основании изложенного алгоритма реализована программная библиотека, включающая в себя функции для поиска и подсчета количества вхождений в заданный текст (тексты) некоторых последовательностей слов (в частности, географических названий, входящих в тезаурус). Работа с программной библиотекой осуществляется через веб-интерфейс.

Пополнение лексического словаря словоформами географических названий

В процессе создания программной библиотеки, реализующей алгоритм извлечения из текста документа географических названий, входящих в тезаурус, встает вопрос о выборе средств, дающих возможность учитывать морфологию слов русского языка. Выбор пал на свободно распространяемый программный продукт Ispell [13], изначально предназначенный для проверки орфографии на разных языках, в том числе русском [9] (язык проверки определяется словарем, который подключает пользователь). Основной подход, положенный ныне в основу словаря, заключается в использовании нормализованной формы слова и правил словоизменения, отвечающих грамматике русского языка. Все слова разбиты на флективные классы (типы словоизменения), каждому из которых ставится в соответствие система окончаний всех словоформ слова-представителя. По этой причине словарь одновременно содержит и важную информацию о морфологии слов, которая необходима для современных русскоязычных поисковых систем. Однако указанный словарь (как, впрочем, и любой другой из известных нам словарей, предназначенных для выполнения аналогичных функций) не содержит словоформ десятков тысяч географических названий, входящих в тезаурус РГБ.

Для правильной работы программной библиотеки, реализующей алгоритм извлечения терминов, входящих в тезаурус географических названий, необходимо пополнение лексического словаря их словоформами. Оно должно проводиться в экспертном режиме, однако работа эксперта по генерации всех словоформ нового слова весьма трудоемка: для существительного с учетом изменения падежа (изменение категории числа для географических названий не происходит) нужно выписать 6 словоформ, для прилагательного с учетом изменения падежа – 6 словоформы (при этом следует учитывать, что притяжательные прилагательные нередко следует изменять и по родам: *Новосибирская область*, *Новосибирский район*, *Новосибирское водохранилище*, т.е. количество словоформ в данном случае достигает 18, а точнее – 24, если еще вспомнить про *Новосибирские острова*). Такой объем механической работы, помимо больших трудозатрат, чреват неизбежным появлением опечаток.

Для автоматизации работы эксперта по генерации словоформ построено веб-приложение, автоматически генерирующее все словоформы заданного слова (существительного или прилагательного) русского языка [11]. Мы ограничились только существительными и прилагательными, поскольку именно эти части речи обычно выступают в качестве новых слов практически в любой предметной области, а глаголы в подавляющем большинстве случаев не являются специфическими для той или иной предметной области и включены в основной словарь Ispell. Очевидно, указанное ограничение вполне допустимо и при решении задачи генерации словоформ географических названий.

В основе работы веб-приложения лежит алгоритм Г.Г. Белоногова [2], использующий разбиение слов языка на флективные классы, т.е. типы словоизменения, каждому из которых ставилась в соответствие система окончаний всех словоформ слова-представителя (основа существительных и прилагательных, как правило, остается неизменной). Всего Г.Г. Белоноговым выделено для существительных 66 флективных классов, для прилагательных – 12, каждому из которых поставлен в соответствие полный набор окончаний.

В случае добавления в словарь географических названий число возможных флективных классов для существительных значительно уменьшается.

Это происходит, во-первых, за счет классов, относящихся к одушевленным существительным как мужского, так и женского рода (таких классов соответственно 19 и 8). Возможные совпадения названий географических объектов с одушевленными нарицательными существительными (*Орел*, *Горняк*, *Чуваши* и т.п.) не нуждаются в специальном анализе, поскольку такая омонимия выявляется заранее в процессе предварительной работы с тезаурусом при составлении списка географических названий, имеющих «негеографические» омонимы, и «многозначных» названий (подробнее об этом см. в следующем разделе), а это означает, что образец склонения слова-омонима уже имеется в лексическом словаре. Что

же касается совпадения названий географических объектов с одушевленными собственными существительными (русскими фамилиями), то, как известно, соответствующие географические названия склоняются по неодушевленному образцу: *с С.М. Кировым*, но *с городом Кировом*.

Во-вторых, флективные классы для неодушевленных существительных зачастую различаются типом склонения лишь во множественном числе, однако для тех географических названий, которые соответствуют форме единственного числа, нет необходимости генерировать словоформы множественного числа.

Наибольшее количество возможных флективных классов, из которых приходится делать выбор, возникает при генерации словоформ географических названий, изначально стоящих во множественном числе: *Печоры*, *Спас-Клепки*, *Выгоничи* и *Ливны* относятся к разным флективным классам. Впрочем, при омонимии географических названий с неодушевленными нарицательными существительными образец склонения слова-омонима также имеется в лексическом словаре, что, в частности, исключает необходимость генерации словоформ географических названий, совпадающих со множественным числом нарицательных неодушевленных нарицательных существительных.

Что же касается прилагательных, входящих в географические названия, то в лексический словарь не входят либо притяжательные прилагательные, относящиеся к географическим названиям (*Болотнинский район*), либо диалектные, простонародные и т.п. слова (*Верхнекошненский Погост*), либо прилагательные, выступающие в качестве имен существительных (*Новокручининский*). При этом большинство подобных слов относится к одному флективному классу.

Таким образом, работа с веб-приложением заключается в следующем. Обработывая новое слово, эксперт устанавливает при необходимости его начальную форму и указывает его тип: независимое существительное, прилагательное или зависимое слово-дополнение в родительном падеже. Зависимое слово сразу добавляется в словарь, так как единственной формой слова (применительно к соответствующему контексту) является оно само (*море Лаптевых*). При выборе независимого существительного на следующем шаге необходимо указать его род и число. Для прилагательного дополнительные характеристики не указываются.

Для уменьшения размеров надклассов, на которые разбиты флективные классы, применяется модификация алгоритма Г.Г.Белоногова из работы [11], состоящая в автоматическом анализе окончаний нормализованной словоформы внутри каждого надкласса, что приводит к значительному уменьшению количества элементов, из которых предстоит сделать выбор. Тем самым программа автоматически проводит предварительный анализ окончания слова, отсеивая те классы, к которым данное слово заведомо принадлежать не может. После этого нужно выбрать флективный класс, которому соответствует слово. Для выбора предоставляется таблица возможных флективных классов, которые определяются словом-представителем и его несколькими характерными словоформами. Количество объектов-альтернатив (с учетом указанных выше особенностей склонения географических названий) доведено до рекомендуемого когнитивной психологией (не более 7-9 альтернатив).

Мысленно просклоняв данное слово по указанным формам и сравнив полученные окончания с окончаниями из таблицы, можно однозначно определить его флективный класс. После этого программа генерирует все формы слова, отображая их в виде таблицы, в которой они распределены по падежам и родам (если это прилагательное). Выводится список уникальных словоформ, так как обычно слово может иметь одинаковые окончания в разных формах. На основании этого списка эксперт принимает решение о занесении словоформ в словарь или, в исключительных случаях, когда сгенерированные словоформы оказываются неверными (например, у слова оказалась изменяемая основа), о переходе в ручной режим работы.

Решение проблемы омонимии

К сожалению, простой подсчет количества вхождений в документ слов и словосочетаний, содержащихся в соответствующем тезаурусе, не является удовлетворительным решением задачи извлечения из текста документа географических названий. Дело в том, что географические названия бывают омонимичны другим словам, являющимися именами как нарицательными: *Орел*, *Белая* и т.п., так и собственными: *Киров*, *Кострома* и т.п. Кроме того, нередко одно и то же название носят сразу несколько различных географических объектов. Возникает необходимость отсеять из полученного набора слов омонимы географических названий, таковыми не являющиеся, а также установить, к какому конкретно географическому объекту относится найденное в документе «многозначное» название.

Важно подчеркнуть, что при решении этой задачи, как и при решении рассматриваемой далее проблемы, выявления названий, действительно отражающих содержание текста, целесообразно использовать следующий подход к определению более нежелательной ошибки («ошибки первого рода»). Отсутствие того или иного конкретного документа вряд ли будет замечено пользователем системы, ищущим документы, привязанные к некоему географическому объекту. Напротив, обнаружив в результатах запроса документ, к интересующему объекту явно не относящийся (а особенно несколько подобных документов), пользователь с большой вероятностью утратит доверие к такой информационно-поисковой системе. Именно поэтому механизм разрешения коллизий должен быть достаточно строгим, чтобы обеспечить отсев посторонних документов.

Итак, для выявления в тексте омонимов географических названий, таковыми не являющихся, а также для конкретизации значения «многозначных» названий, необходимо заранее в процессе работы с тезаурусом составить список географических названий, имеющих такие омонимы, и «многозначных» названий.

Если «многозначные» названия в тезаурусе выявляются достаточно просто, путем его непосредственного анализа (а также путем сравнения тезауруса российских географических названий с иностранными аналогами: например, населенные пункты *Николаевка, Павловка* и т.п. имеются как в России, так и на Украине), то выявление омонимов «общего плана» – задача более сложная. Омонимы имен нарицательных выявляются в процессе сравнения тезауруса географических названий с общим лексическим словарем, используемым программной библиотеке. Омонимы имен собственных могут быть обнаружены при сравнении тезауруса с биографическими, мифологическими и т.п. словарями. При этом, разумеется, никогда нельзя быть уверенным в достаточно полном выявлении омонимов указанного типа, поскольку небольшие населенные пункты могут носить имена деятелей местного масштаба, чьи имена не встречаются в сколько-нибудь распространенных биографических словарях (но, вместе с тем, имена этих деятелей могут встретиться, например, в документах, посвященных истории соответствующего региона).

Кратко изложим подходы к выявлению омонимов и конкретизации «многозначных» названий применительно к конкретному документу. Наиболее общим приемом выявления нарицательных омонимов является учет регистра первой буквы слова. Этот прием может оказаться неэффективным, если омонимичное слово является первым словом в предложении, а также если заголовок документа набран прописными буквами. В случае неоднократного вхождения такого слова в текст почти наверняка удастся выявить его смысл путем анализа регистра первой буквы всех его вхождений. Если же омонимичное слово встречается только раз (и притом в качестве первого слова в предложении), то относить его к географическим названиям вряд ли целесообразно хотя бы потому, что географические названия зачастую употребляются с предлогом указания места или направления (т.е. не выступают в качестве первого слова предложения), а в случае возможной омонимии – и с указанием типа географического объекта (*город Орел, река Белая* и т.п.).

Последнее соображение учитывается и при выявлении омонимов – имен собственных (не относящихся к географическим названиям): «географический» омоним будут характеризовать предлоги или (и) указание типа географического объекта, а «персональный» могут характеризовать, например, инициалы или имя персоны (все подобные сведения должны храниться в специальном дополнительном словаре, предназначенном для идентификации омонимов).

Наиболее сложна задача о конкретизации «многозначных» географических названий. Для ее решения следует учитывать возможное указание типа географического объекта (*река Москва*), вхождение в текст названия региона, к которому может принадлежать объект, вхождение в текст других географических названий, относящихся к этому региону (если последний явно не упомянут) и т.п. При этом следует учитывать сравнительную значимость объектов: например, при отсутствии дополнительных сведений о принадлежности к региону населенного пункта *Киров* речь почти наверняка идет об областном центре, а не о городе в Калужской области.

Определение названий, отражающих содержание документа

После того, как из текста документа выделены все входящие в него географические названия и конкретизированы «многозначные» названия, неизбежно встает главный вопрос: какие именно названия отражают содержание документа, т.е. к каким элементам тезауруса (а, следовательно, и к географическим координатам) следует привязывать этот документ?

По-видимому, наиболее простым вариантом, не требующим привлечения сложных алгоритмов семантического анализа текста, является проверка вхождения наименования в метаданные (атрибуты библиографического описания) документа.

Если географическое название встретилось в названии документа, его аннотации, ключевых словах, а также (применительно, например, к документам с новостных лент) в атрибуте «место события» («место передачи информации»), то такое название следует считать отражающим содержание документа.

В случае, если указанное правило «сработало», то привязывать документ к иным географическим названиям, входящим в текст документа, но не встречающимся в названных атрибутах, представляется нецелесообразным.

Если же перечисленные атрибуты не содержат географических названий, то проводится анализ вхождения названий непосредственно в текст документа, при этом отражающими содержание документа признаются название, имеющее наибольшее число вхождений, а также следующие за ним по числу вхождений названия, частота встречаемости каждого из которых отличается от предыдущего не более чем на величину некоторого коэффициента (устанавливаемого эмпирически). Кроме того, в этот список целесообразно добавить и первое по порядку вхождения географическое название (если, разумеется, оно в нем отсутствует).

Заключение

Описанный в статье алгоритм автоматизированного извлечения из текста документа географических названий, отражающих его содержание, является частным случаем аналогичного алгоритма из работы [11], предназначенного для анализа текстов произвольной тематики. Работоспособность общего алгоритма была проверена при решении ряда практических задач, однако предложенная в данной статье модификация алгоритма, предназначенная для работы с географическими названиями, способна значительно повысить его эффективность.

Литература

1. Баракнин В.Б., Куперштох А.А. Алгоритм координатного индексирования электронных научных документов // Труды международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Казахстан, Павлодар, 20-22 сентября 2006 г. Т. I. С. 228-232.
2. Белоногов Г.Г., Новоселов А.П. Автоматизация процессов накопления, поиска и обобщения информации. М.: Наука, 1979.
3. Жижимов О.Л., Мазов Н.А. География и стандарты метаданных для электронных библиотек: содержание, применение, проблемы [Электронный ресурс] // Электронные библиотеки. 2009. Т.12. № 1. <http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2009/part1/ZM>
4. Жижимов О.Л., Мазов Н.А. Об использовании географических координат при поиске библиографической информации // Научные и технические библиотеки. 2009. № 1. С. 54-60.
5. Жижимов О.Л., Мазов Н.А. Проблемы географической привязки цифровых объектов в электронных библиотеках // Труды Двенадцатой Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2010). Казань, 13-17 октября 2010 г. С. 207-214.
6. Лавренова О.А. Многоязычный доступ к данным на основе тезауруса географических названий // Сборник тезисов постерных докладов Девятой Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2007).. Переславль – Залесский, 15-18 октября 2007 г. С. 57-62.
7. Скачков Д.М., Жижимов О.Л. О профиле доступа к данным тезауруса для ретроспективного геокодирования и географического поиска в электронных библиотеках // Восемнадцатая международная Конференция «Крым 2011», Судак, 4–12 июня 2011 г. <http://www.gpntb.ru/win/inter-events/crimea2011/disk/059.pdf>
8. Скачков Д.М., Жижимов О.Л. Об использовании ретроспективного геокодирования для географического поиска в электронных библиотеках // Труды Тринадцатой Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2011). Воронеж, 19-22 октября 2011 г. (в печати).
9. Словарь русского языка для Ispell. <http://semiconductors.phys.msu.su/~swan/orthography.html>
10. Тезаурус РГБ. http://aleph.rsl.ru/F/?func=file&file_name=find-b&local_base=tst11
11. Шокин Ю.И., Федотов А.М., Баракнин В.Б. Проблемы поиска информации. Новосибирск: Наука, 2010.
12. Getty Thesaurus of Geographic Names Online. <http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/tgn/index.html>
13. Ispell – Spell checker. <http://directory.fsf.org/ispell.html>
14. The Zthes specifications for thesaurus representation, access and navigation. <http://zthes.z3950.org>

Геопортал Иркутского научного центра СО РАН

И.В. Бычков, Г.М. Ружников, А.Е. Хмельнов, Р.К. Федоров, А.С. Гаченко, А.О. Шигаров

Институт динамики систем и теории управления СО РАН, Иркутск

Введение

Обработка геоданных изначально считалась прерогативой настольных программных систем. Это происходило из-за большого объема обрабатываемых данных, низкой скорости передачи данных через Интернет, недостаточным развитием средств пользовательского интерфейса Интернет приложений. На сегодняшний день сети передачи данных, интернет технологии активно развиваются, повсеместно улучшая возможности Интернет приложений. Существует тенденция перехода от локальных вычислений к распределенным. В частности, активно развиваются облачные вычисления [1] (технологии обработки данных, в которых компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как Интернет-сервис). Перенос обработки и хранения данных на удаленные серверы имеет ряд преимуществ: для работы пользователю часто достаточно иметь только браузер, пользователь не привязан к рабочему месту, значительно проще обновление и обслуживание системы. Примером таких сервисов является система хранения и редактирования документов Google (<http://docs.google.com>).

В этом направлении развиваются географические информационные системы (ГИС), например FreeGIS Database (<http://freegis.org>), Quantum GIS Project (<http://www.qgis.org>), Advanced Geographical Information System for the Web (<http://www.cartoweb.org>), а также геопорталы, являющиеся важным элементом инфраструктуры пространственных данных (ИПД) [4]. Необходимо заметить, что в ИПД геопорталы реализуют в основном функции, связанные с публикацией данных в Интернет, т.е. загрузку и визуализацию данных, формирование метаинформации и т.д. Применение алгоритмов геообработки (для выполнения задач анализа) в технологиях облачных вычислений развито достаточно слабо. Хотя существует довольно много программных библиотек, реализующих функции геообработки, в открытом доступе.

Применение технологий облачных вычислений для проведения научных исследований является перспективным направлением развития геоинформатики и обладает рядом преимуществ.

- Обеспечение надежного хранения данных, что будет способствовать накоплению научных данных.
- Открытый доступ к алгоритмам, моделям и методам геообработки данных, возможность постоянного расширения банка алгоритмов.
- Отсутствие необходимости установки у пользователя сложного (уникального) программного обеспечения и его обслуживания. Для работы достаточно наличие браузера и сети Интернет.
- Использование вычислений в распределенной среде (многопроцессорные системы) для ресурсоемких приложений геообработки.

Перечисленное выше подчеркивает актуальность использования технологии облачных вычислений при создании ГИС и ИПД и ее элементов.

Общие принципы построения геопортала

Рассмотрим основные принципы (требования) построения геопортала, соответствующего технологиям облачных вычислений.

- *Удобство работы.* Геопортал должен обеспечивать: использование набора сервисов геообработки и пространственных данных, распределенных на различных серверах (рис 1.); для пользователя использование сервисов, расположенных на удаленных серверах, не должно отличаться от работы с локальными сервисами; поддержку большинства распространенных форматов пространственных данных и проекции; предоставление удобного, интуитивно понятного пользовательского интерфейса; возможность быстрой публикации в Интернет как данных, так и метаданных.
- *Надежность.* Обеспечение надежного хранения данных на сервере и предоставление функций работы с файловой системой сервера. Обеспечение регламентированного доступа к пользовательским сервисам геообработки и пространственным данным. Самостоятельное определение поставщиком регламента доступа к его сервисам и данным.
- *Расширяемость.* Использование открытой архитектуры, которая позволяет расширять функциональность геопортала путем добавления новых сервисов, находящихся локально на сервере геопортала, так и удаленно на других серверах. Поддержка стандартов в области геоинформатики для учета новых программных систем, реализующих функции анализа и обработки, что увеличивает интероперабельность программных системам.

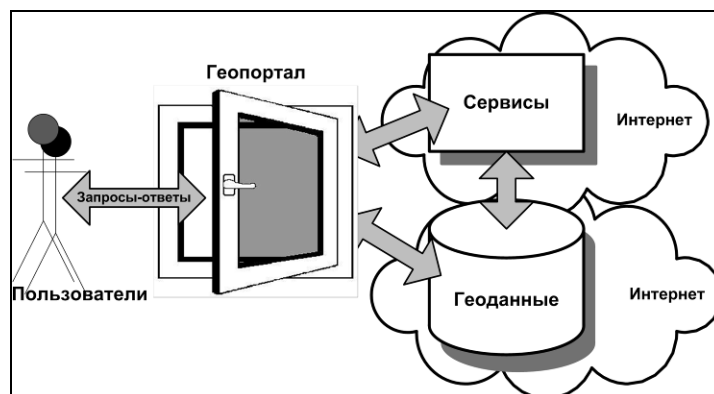


Рис. 1. Геопортал как единая точка доступа к сервисам геообработки и пространственным данным.

Стандарты и эталонная архитектура геопортала

С целью содействия в реализации геопорталов, основанных на стандартах и совместимых с ИПД, организацией OGC (Open Geospatial Consortium) опубликован проект стандарта [2], в котором дано описание эталонной архитектуры геопортала (Geospatial Portal Reference Architecture, GPRa). В документе [2] GPRa предлагается, как основная архитектурная платформа для основанных на стандартах геопорталов, которые предоставляют Интернет-доступ к геопространственным данным (ПД) и сервисам геообработки (СГ). Такие геопорталы могут строиться из различных совместимых продуктов, которые используют интерфейсы, протоколы и схемы, реализующие OGC OpenGIS стандарты.

Предлагаемая в проекте [2] архитектура основана на SOA (Service Oriented Architecture) и включает пять следующих класса сервисов.

1. *Сервисы портала (Portal Services)* организуют на портале единую точку доступа к ПД и СГ, обеспечивают управление и администрирование порталом. К таким сервисам относятся клиенты визуализации ПД, публикации и поиска ПД и СГ, указателя географических названий, извлечения и управления ПД, управления стилями, аутентификации и управления доступом к ПД и СГ.
2. *Сервисы визуализации (Portrayal Services)* обеспечивают визуализацию ПД. Например, к таким сервисам относятся серверы визуализации карт с поддержкой стандартов OGC Web Map Server (WMS) [5] и OGC Styled Layer Descriptors (SLD) [6], а также серверы визуализации покрытий (растров) с поддержкой обсуждаемого стандарта OGC Web Coverage Service (WCS) [7].
3. *Сервисы каталогов (Catalogue Services)* обеспечивают публикацию, поиск и просмотр метаданных о ГД и СГ. Например, одним из таких сервисов является каталог метаданных GeoNetwork [3].
4. *Сервисы доступа к данным (Data Services)* предоставляют геопространственной наполнение и обработку данных, обеспечивают доступ к различным хранилищам геопространственной информации (репозиториям и базам данных). В частности, такие сервисы обеспечивают запросы и получение пространственных объектов и атрибутов клиентской частью приложения с использованием OGC Geography Markup Language (GML) [8] на основе стандарта OGC Web Feature Service (WFS) [9].
5. *Сервисы геообработки пространственных данных* обеспечивают обработку пространственных данных, В частности выполнение таких операций как создание буферных зон, оверлейные операции и т.д. на основе стандарта OGC Web Processing Service (WPS) [10].

Архитектура геопортала ИНЦ СО РАН

Основываясь на приведенных принципах построения геопортала и существующих стандартах, разработана следующая архитектура (рис 2).

Архитектура разрабатываемой системы является клиент-серверной. Основным компонентом на стороне пользователя является Web-клиент, работающий на основе браузера. Предполагается, что с помощью его можно выполнить большинство функций геопортала. Кроме Web-клиента, возможно использование различных ГИС и прочих программ, поддерживающих стандарты OGC. На серверной стороне находится расширяемый комплекс различных компонентов. Рассмотрим более подробно основные серверные компоненты системы.

Система управления сервисами и геоданными (СУСГ) осуществляет общее управление над геопорталом. Предоставляет следующие функции: файловый менеджер, управление доступом к данным и сервисам, публикацию и отображение пространственных данных, запуск методов геообработки данных. СУСГ разработан на основе свободно-распространяемой системы управления содержимым Drupal.

Система хранения данных (СХД) – программно-аппаратное обеспечение надежного хранения данных на основе SAN ReadyStorage 3994 с общей стартовой дисковой емкостью 62 Тбайт, которое гарантирует надежное хранение пользовательских данных, бесперебойную работу и достаточно высокую скорость чтения/записи данных. Доступ к СХД производится с помощью файлового менеджера.

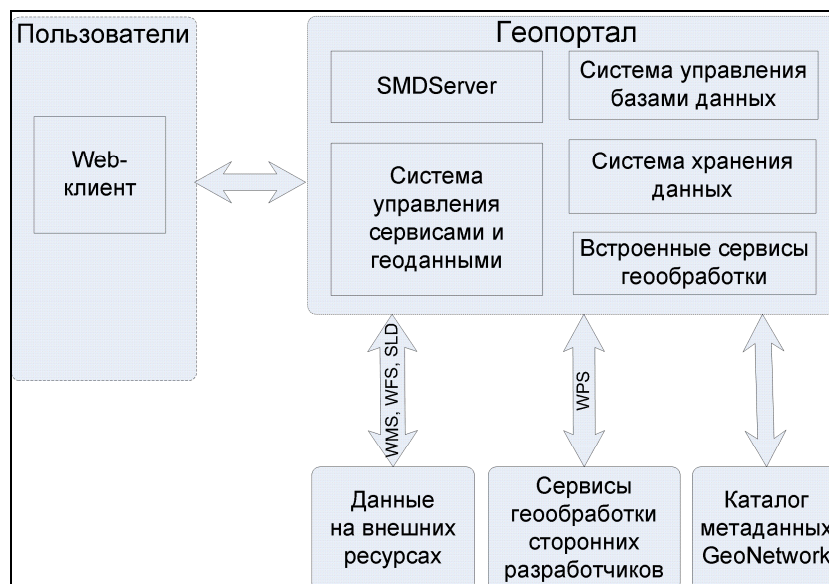


Рис. 2. Архитектура геопортала.

Система управления базами данных PostgreSQL (с расширением для обработки пространственных данных PostGIS) предназначена для хранения пользовательских наборов данных и служебной информации геопортала. Расширение PostGIS позволяет хранить пространственные данные и реализует поддержку стандартов OGC. Управление над базами данных (БД) осуществляется с помощью СУСГ: создание пользователей БД на основе регистрации в портале, создание схем данных, предоставление соответствующих прав доступа, конвертация данных и т.д.

SMDServer – предназначен для визуализации карт в сети Интернет. Обеспечивает высокую скорость отображения графической и атрибутивной информации.

Сервисы предоставляют обработку пространственных данных, т.е. это программные единицы, выполняющие различные функции и предоставляющие некоторый интерфейс. Архитектура разработана таким образом, чтобы обеспечить возможность расширения функциональности путем добавления новых сервисов. Большинство функций геопортала реализовано в виде сервисов, например конвертация данных из одного формата в другой.

Рассмотрим более подробно основные функции геопортала, реализованные компонентами архитектуры.

Управление данными

Хранение данных пользователей осуществляется на основе СХД SAN ReadyStorage 3994 в виде файловой системы. Каждому пользователю предоставляется директория в рамках СХД. Создание директории и выделение соответствующих прав выполняет СУСГ. Управление файловой системой в рамках выделенной директории пользователь производит с помощью файлового менеджера (рис. 3.). Файловый менеджер является частью СУСД и позволяет производить все основные операции с файловой системой через Web-клиента, а также загрузку и выгрузку данных с компьютера пользователя. Для удобства данные можно загружать и выгружать в заархивированном виде. Имеются специализированные сервисы, позволяющие архивировать/разархивировать данные в СХД.

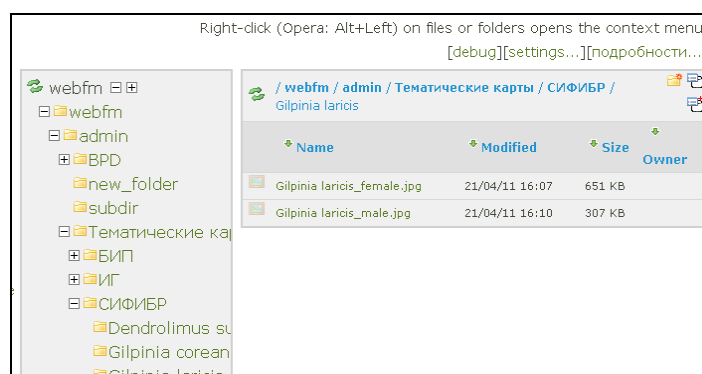


Рис. 3. Файловый менеджер.

Публикация и визуализация пространственных данных

Для визуализации пространственных данных разработан оригинальный сервис, называемый SMDServer, который, в том числе, реализует WMS стандарт. Поэтому для работы с SMDServer может использоваться любой клиент визуализации пространственных данных с поддержкой WMS, например, широко распространенный web-клиент OpenLayers или настольная ГИС MapInfo.

SMDServer базируется на следующих принципах:

- данные не требуется редактировать, поэтому они рассматриваются как неизменяемые;
- программа просмотра должна отображать весь объем данных, как единое целое;
- время отображения любого фрагмента карты должно быть максимально сокращено;
- основная задача – поиск информации на карте;
- при необходимости более сложной обработки выбранный фрагмент может быть экспортирован.

В SMDServer используется оригинальный формат представления векторных данных, названный SMD (Static Map Data). Это формат позволяет эффективно (по времени отображения на экран) визуализировать пространственные данные, включая сверхбольшие массивы таких данных. Также SMD позволяет хранить и обрабатывать семантическую информацию, как для реляционного, так и для тегового представления. Основными операциями, производимыми над данными в формате SMD, являются просмотр и выборка карт. При этом предполагается, что пространственные данные подготавливаются в других ГИС с использованием их аналитических возможностей. Редактирование и аналитические операции также должны в основном выполняться в других ГИС. Для преобразования таких данных в формат SMD разработан ряд конверторов, в том числе, реализован импорт из следующих форматов: SXF/RSC (ГИС Панорама), APR/Shape (ГИС ArcView), WOR/TAB (ГИС MapInfo), ГИС КАМАТ. При этом поддерживает импорт не только метрической и семантической информации, но и способа визуализации.

Для сокращения в SMDServer времени визуализации пространственных данных используется: пространственная индексация (ускоряет отображение фрагментов карты); а также сортировка списков объектов по предельным масштабам (ускоряет отображение всей карты). При сортировке по предельным масштабам каждый пространственный объект характеризуется диапазоном масштабов, в котором он отображается. Списки объектов упорядочиваются по убыванию знаменателя Mmin (от крупных объектов к мелким). Как только встречается объект, который слишком мал, чтобы отображаться при текущем масштабе ($M_{cur} > M_{min}[i]$), просмотр списка можно прервать, т.к. это условие будет выполняться и для всех последующих объектов. Для минимизации времени загрузки представление в формате SMD включает в себя образ оперативной памяти, содержащий неизменяемые пространственные данные (компиляцию структур данных). Файл SMD содержит образ памяти с данными объектов и информацию о перемещаемых адресах, находящихся в этой памяти. При этом отсутствует информация о разбиении области данных на отдельные объекты. Данный подход аналогичен подходу, используемому в исполняемых файлах, и позволяет многократно ускорить загрузку данных в память.

Часто для представления семантической информации в ГИС каждый слой карты рассматривается, как таблица БД, а объект, связанный с записью, рассматривается в качестве значения специального поля этой таблицы. Также для этого применяется теговый формат представления семантики, при использовании которого в одном слое могут находиться объекты, относящиеся к разным классам, и характеризующиеся различными наборами атрибутов.

Для представления семантической информации в SMD используется статическая БД, которая позволяет хранить неизменяемые таблицы, поддерживает возможность эффективного включения в таблицу большого количества необязательных полей, и допускает наличие в одной записи нескольких значений одного необязательного поля. Неизменяемость этих данных используется для оптимизации хранения строковых значений.

За счет этих способов ускорения скорость работы SMDServer на Pentium IV 3GHz при работе с картой Иркутска, которая содержит 820 тыс. объектов (данные занимают 125 Mb) составляет: вся карта отображается за 3с., загрузка этой карты в память выполняется за 10 с.

При загрузке популярных форматов карт в СХД производится автоматическая конвертация в формат SMD и регистрация в SMDServer. Файловый менеджер при изменении содержимого той или иной директории отправляет сообщение модулю публикации, который при изменении содержащихся картографических файлов в директории производит их конвертацию или удаление соответствующих SMD файлов. Затем производится их регистрация в инициализационном файле SMDServer. Просмотр данных в этом случае доступен только владельцу данных. Для просмотра данных другими пользователями необходима их публикация (рис. 4). Публикация производится наборами данных. Набор данных это директория с семантически связанными картографическими слоями, находящимися в одной проекции на одну территорию. Во время публикации пользователь должен указать, в какой директории находятся данные, и ввести метаданные, описывающие создаваемый ресурс.

Название: *

srid:

Предметная область:

Путь к набору данных:

Информация об источнике, из которого был получен описываемый информационный ресурс:

Коды классификатора UDK/УДК (Universal Decimal Classification, <http://www.udcc.org>, <http://teacode.com/online/udc>) (можно указать несколько кодов):

Авторы, создавшие информационный ресурс:

Рис. 4. Публикация набора данных.

Управление метаданными

Стандарты метаданных устанавливают регламент взаимодействия участников информационного обмена и разработчиков в сфере создания геопорталов. С их помощью можно создавать словари и классификаторы, специфичные для междисциплинарных научных исследований. За основу представления и хранения метаданных в рамках геопортала выбран известный стандарт FGDC-STD-001-1998 (Content Standards for Digital Geospatial Metadata) – американский прототип ISO 19115, стандарт содержания на цифровые пространственные метаданные. Механизмы хранения и обработки метаданных реализованы на основе GeoNetwork [6] стандартизированной и децентрализованной среды управления пространственной информацией, разработанной для доступа к базам геоданных, картографическим продуктам и связанным с ними метаданным из различных источников, повышающей эффективность обмена пространственной информацией между институтами и ее совместное использование посредством Интернета. Такой подход обеспечивает увеличение доступности междисциплинарных пространственных данных различного масштаба при проведении междисциплинарных исследований.

Сервисы геообработки

Методы обработки пространственных данных геопортала реализуются в виде сервисов. Разработанная архитектура геопортала позволяет добавлять сервисы, путем их регистрации в каталоге метаданных. После регистрации с помощью Web-клиента пользователь может воспользоваться сервисами, используя свои данные, и получить результаты обработки. Входные данные могут быть в виде файлов, строковых и числовых параметров. Результаты обработки сохраняются в виде файлов в СХД. Сервисы могут быть встроенными (т.е. программными модулями, выполняющими обработку данных на локальном сервере геопортала) и внешними (выполняются на удаленных серверах и должны поддерживать стандарт WPS). С точки зрения пользователя работа с встроенными и внешними сервисами не отличается. При обращении к определенному сервису модуль управления сервисами генерирует форму для ввода пользователем параметров (рис. 5). Затем формируется запрос и запускается обработка.

Shape файл, на основе которого создается грид:

Название грида на выходе:

Экстент карты, для которой создается грид:

Название поля с Z координатой:

Run

Рис. 5: Вызов сервиса создания GRID-покрытия на основе SHP-файла.

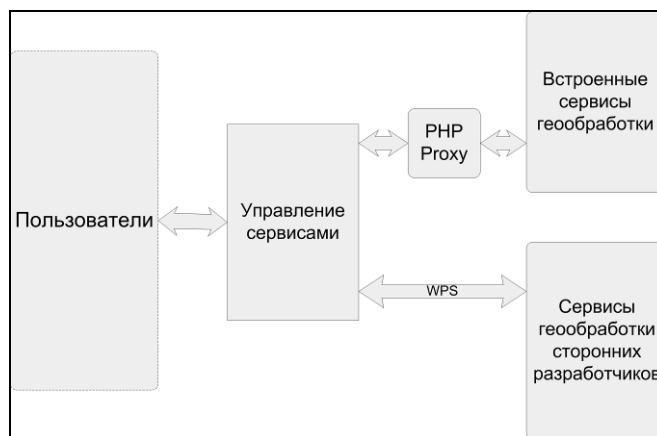


Рис 6. Взаимодействие сервисов с геопорталом.

Регистрируемый сервис должен реализовывать программные интерфейсы взаимодействия с геопорталом. Для внешних сервисов должен быть реализован интерфейс, определенный стандартом WPS. В качестве встроенных сервисов предполагается использовать существующее программное обеспечение, которое обычно не поддерживает стандарт WPS. Поэтому для организации взаимодействия геопортала с существующим программным обеспечением требуется создание специальных компонентов-посредников (PHP Proxy), необходимых для запуска, сбора и передачи данных.

Приложения

На основе предлагаемого геопортала институтами Иркутского и Бурятского научных центров СО РАН реализованы следующие информационные ресурсы.

1. *Интерпретационная карта “Природные геосистемы Байкальского региона и их использование”*, которая отражает структуру геосистем, условия функционирования, гидротермические параметры, биологическую продуктивность, геоэкологический потенциал, чувствительность к антропогенным нагрузкам и социально-экономические функции (Институт географии СО РАН).
2. *Хранилище тематических векторных геоданных для территории дельтовых районов рек Селенга и Верхняя Ангара*, которое содержит тематические слои по природным и социально-экономическим условиям состояния территории, геофизические и геохимические характеристики территории, а также планово-высотные метрические параметры пространственных объектов, и является информационной основой для междисциплинарных научных исследований дельтовых районов озера Байкал (Байкальский институт природопользования (БИП) СО РАН).
3. *Цифровые модели рельефа на территорию бассейна озера Байкал и дельты реки Верхняя Ангара*, которые являются GRID-покрытиями, созданными на основе изолиний рельефа и отметок высот и глубин векторной топографической основы масштаба 1:1000000, размер стороны пространственной ячейки – 300 м (БИП СО РАН).
4. *Карты потенциального стока углерода трех видов хвойных деревьев*, созданные на основе анализа стока углерода по годичной фотосинтетической продуктивности хвойных древостоев Иркутской области (Сибирский институт физиологии и биохимии растений (СИФИБР) СО РАН).
5. *Информационно-аналитическая база показателей трансформации углерода в разных агроэкосистемах*, позволяющая с учетом структуры посевных площадей в отдельных районах дать оценку баланса углерода в агроэкосистемах и эмиссии CO₂ из агроэкосистем за год (СИФИБР СО РАН).
6. *База данных по хвоегрызущим насекомым Байкальской Сибири*, включающая сведения о 141 виде хвоегрызущих насекомых из 14 семейств. По каждому виду вредителей выделены ландшафты, в которых возникают очаги их массовых размножений в пределах отдельных лесопатологических районов Байкальской Сибири, указывается повреждаемая порода и степень вредоносности, библиографическая сводка (СИФИБР СО РАН).
7. *Тематические пространственные базы данных по древесно-кольцевым хронологиям Прибайкалья* с точными географическими координатами и по флоре Байкальского региона (фотоматериалы растений в природе и в гербарии) (СИФИБР СО РАН).
8. *База данных по сосудистым растениям* (оригинальные материалы, собранные авторами, материалы гербариев NSK (Гербарий им. М.Г. Попова, ЦСБС СО РАН, г. Новосибирск) и IRK (Гербарий СИФИБР СО РАН, г. Иркутск); все данные о конкретных местонахождениях видов внесены в Базу данных (БД), которая сейчас включает более 14700 записей; подготовлено свыше 10000 цифровых фотографий гербарных листов и около 1000 фотографий растений в природе) (СИФИБР СО РАН).

Заключение

Предлагаемый геопортал является важной частью ИПД, формируемой в ИНЦ СО РАН. Важной особенностью разрабатываемого геопортала является использование не только известных технологий построения ИПД (например, GeoServer, MapServer, OpenLayers), но также и оригинальных технологий, включая сервисы визуализации и геообработки (например, SMDServer). При этом геопортал ИНЦ СО РАН основан на использовании международных стандартов OpenGIS OGC. Это обеспечивает возможность широкого применения данного геопортала в ИПД.

В настоящее время продолжается разработка геопортала. Основное направление текущего развития заключается в расширении сервисов обработки геоданных. В частности реализуется система ввода и редактирования пространственных данных, а также сервисов обработки GRID данных (например, рельефа). Создаются сервисы обработки растровых карт, в частности, распознавание и выделение различных объектов. Геопортал доступен по адресу <http://geos.icc.ru>.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-07-00426-а, 11-07-92204-Монг_а, проекта ОНИТ СО РАН №3 2009-2011, и интеграционного проекта СО РАН № 121 2009-2011.

Литература

1. Armburst M. et al. Above the Clouds: A Berkeley View of Cloud Computing. Tech. report UCB/EECS-2009-28. Electrical Eng. and Computer Science Dept., Univ. of California, Berkeley, 2009. P. 23.
2. Geospatial Portal Reference Architecture. A Community Guide to Implementing Standards-Based Geospatial Portals / L.C. Rose (Ed.) // Open Geospatial Consortium Inc. OGC 04-039 Ver. 0.2.2004.
3. GeoNetwork. <http://geonetwork-opensource.org>
4. The SDI Cookbook. Eds: D.D. Nebert. Global Spatial Data Infrastructure (GSDI) Association. 2009. <http://www.gsdi.org/gsdicookbookindex>
5. OGC Web Map Server (WMS). <http://www.opengeospatial.org/standards/wms>
6. OGC Styled Layer Descriptors (SLD). <http://www.opengeospatial.org/standards/sld>
7. OGC Web Coverage Service (WCS). <http://www.opengeospatial.org/standards/wcs>
8. OGC Geography Markup Language (GML). <http://www.opengeospatial.org/standards/gml>
9. OGC Web Feature Service (WFS). <http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>
10. OGC Web Processing Service (WPS). <http://www.opengeospatial.org/standards/wps>

Система анализа многомерных статистических данных социально-экономического положения республики Монголия на основе технологии метаописаний

А.А. Ветров¹, Е.С. Фереферов¹, А.Е. Хмельнов¹, Б. Цогоо²

¹ Институт динамики систем и теории управления Сибирского Отделения РАН.

² Director of the Mongolian Development Institute under the Office of the President of Mongolia and the Mongolian Academy of Sciences

Введение

Информационные системы крупных организаций и компаний, как правило, содержат пакеты прикладных программ комплексного анализа данных, планирования, прогнозирования и принятия управленческих решения. Для поддержки проведения такой информационно-аналитической работы необходимо создать единый, неизменяемый, предметно-ориентированный, привязанный ко времени информационный ресурс данных - хранилище данных (Data Warehouse) [1].

Хранилище данных

Хранилище данных (ХД) представляет собой информационный источник, представляющей аналитическую ценность, интегрируя уже существующие системы, данные из которых предварительно приводятся к стандартам, очищаются от противоречий, структурируются и обобщаются с требуемым уровнем детализации. Важнейшим элементом ХД является метаинформация, т.е. информация о структуре, связях и содержании данных, которая обеспечивает эффективное взаимодействие различных компонент хранилища.

Отличия типового хранилища данных от обычной реляционной базы данных:

- Обычные базы данных предназначены для того, чтобы помочь пользователям выполнять повседневную работу, тогда как хранилища данных предназначены для принятия решений.
- Обычные базы данных подвержены постоянным изменениям в процессе работы пользователей, а хранилище данных относительно стабильно: данные в нем обычно обновляются согласно расписанию (например, еженедельно, ежедневно или ежечасно — в зависимости от потребностей). В идеале процесс пополнения представляет собой просто добавление новых данных за определенный период времени без изменения прежней информации, уже находящейся в хранилище.
- Хранилище наполняется массовой загрузкой данных, и обычные базы данных чаще всего являются источником данных для ХД. Кроме того, хранилище может пополняться за счет внешних источников, например статистических отчетов [2].

Реализация концепции хранилища данных позволяет проанализировать разрозненные данные, хранящиеся в корпоративной сети в форматах различных СУБД и обеспечить выполнение сложных аналитических запросов к информации.

Формирование хранилища

Принято выделять три базовых этапа обработки данных[3]:

- извлечение (extraction) – извлечение данных из внешних источников в необходимом формате;
- преобразование (transformation) – преобразование структуры исходных данных в структуры, удобные для построения аналитической системы;
- загрузка (loading) – загрузка данных в хранилище.

Можно добавить этап очистки данных (cleaning) – процесс отсеивания несущественных или исправления ошибочных данных на основании статистических или экспертных методов. После завершения этапа загрузки, становится возможным проведение анализа.

Анализ данных

Конечной целью использования ХД является анализ данных и представление результатов этого анализа в виде, удобном для восприятия и принятия решений. Анализ – исследование данных с целью принятия решений, которое является базовой функциональностью систем поддержки принятия решений (СППР). Стоит указать, что работа с СППР отличается от простого набора регламентированных и нерегламентированных отчетов тем, что анализ в СППР практически всегда итеративен и интерактивен. То есть аналитик работает с данными, составляя и корректируя аналитические запросы, и получает отчеты, структура которых заранее может быть неизвестна.

Одним из наиболее востребованных видов анализа является OLAP анализ (On-line analytical processing). В 1993 г. эта технология была описана Эдгаром Коддом [4]. OLAP – ключевой компонент организации хранилищ данных. Назначение систем класса OLAP – предоставить пользователям гибкий,

интуитивно понятный и простой доступ к данным. В основе концепции OLAP лежит принцип представления данных в виде многомерного куба, причем пользователь может быстро свернуть или развернуть данные по любому измерению. Такой доступ позволяет отказаться от использования предопределенных отчетов, делает пользователей самодостаточными, независимыми от администраторов баз данных и программистов [5].

Существующие подходы к организации анализа многомерных данных, в реализации большинства крупных производителей программного обеспечения (ПО), предлагают решения ориентированные на работу с предопределенной системой управления базами данных (СУБД) собственной разработки. Поэтому такие решения не оставляют возможности выбора СУБД. Эту проблему можно решить, создав «слой» между этими двумя компонентами.

Метаописания

Для унификации проведения анализа многомерных данных, а также процессов извлечения и загрузки данных при формировании ХД, предлагается использовать технологию метаописаний БД, которая активно используется для автоматизации процесса создания приложений работающих с БД [6]. Данная технология успешно используется для создания настольного (standalone) программного обеспечения, реализующего функциональность удобной CRUD системы (акроним названий операций create, read, update, delete), а также расширяемого дополнительными частями (модулями), такими как визуальный построитель сложных запросов к БД, функции геоинформационных систем и другие.

Под метаописанием данных понимается заданная по определенным правилам информация, описывающая структуру БД, направленная на взаимодействие пользователя с этой БД через генерируемый интерфейс пользователя. Элементы метаописаний состоят из секций о подключении к БД, таблицах, представлениях, их полях, связях между таблицами, представлениями и вспомогательной информации, такой как построение меню, названия данных на русском языке и др. [7]. Метаописания позволяют описать данные любой БД, управляемой современной СУБД, при этом такого описания достаточно для создания автоматически генерируемого интерфейса универсальным программным обеспечением, позволяющего полноценно работать с данными, формируя тем самым коммерческую информационную систему (ИС). Применение технологии метаописаний БД открывает возможность использования одного ПО с несколькими разными БД без перекомпиляции, меняя лишь метаописание. Эта технология отделяет развитие базовой функциональности информационных систем от дополнительной (специфичной для конкретной предметной области), ускоряя тем самым ввод новых функций и ключевых новшеств в базовую часть. Для внесения правок в функционирующую систему, при изменении модели данных, достаточно изменить незначительную часть метаописания. Следует отметить, что если осуществлен переход от одной СУБД к другой без существенного изменения типов и структуры данных, то поправив несколько строк метаописания, можно легко получить работоспособную ИС с той же функциональностью. Неоспоримым преимуществом данной технологии также является сокращение сроков создания реальных информационных систем по сравнению с традиционными подходами, связанными с описанием объектов ХД и связей между ними средствами визуального программирования и в коде приложения.

В существующей технологии метаописания БД хранятся в файлах на локальных машинах [7]. Для аналитических систем, разрабатываемых в технологии клиент-сервер, метаописания ХД рационально перенести из файла метаописаний в таблицы на сервер. Также учитывая специфику ХД, метаописания следует расширить дополнительными секциями, при этом логично организовать все связи между тематическими данными ХД возможностями технологии метаописаний, вместо непосредственного связывания средствами СУБД, что даст больше информации для построения автоматически генерируемого интерфейса пользователя. Учитывая вышеперечисленные требования, к метаописаниям БД следует добавить секции с информацией об измерениях, об используемых в измерениях полях, о таблицах фактов, о полях таблиц фактов.

Для формирования структуры ХД, используя технологию метаописаний, целесообразно разработать инструмент администрирования, что заметно улучшит скорость и качество создания структуры ХД и его наполнения, так как отсутствие такого требует от администратора/разработчика высокой квалификации и внимательности по контролю целостности данных.

Информационная система MDAttr

Для выборки и анализа многомерных данных разработана система MDAttr, в которой числовые атрибуты могут собираться в различных разрезах и зависеть от различного числа характеристик. Эта система реализует:

- 1) технологию метаописаний;
- 2) многомерное концептуальное представление данных, включая полную поддержку множественных иерархий;
- 3) компактное хранение детализированных данных и поддержку больших БД, низкое время отклика при работе с агрегированными данными;

- 4) OLAP-анализ набора числовых атрибутов, которые могут зависеть от различного числа характеристик;
- 5) привязку территорий к карте (если имеется и используется) с возможностью построения тематических карт;
- 6) клиент-серверную архитектуру, многопользовательский доступ.

Серверная часть представляет собой хранилище данных, которое может быть сконфигурировано администратором под конкретную предметную область. Клиентская часть предоставляет пользователю гибкий доступ к данным хранилища с использованием интуитивно-понятного интерфейса, построенного по принципу систем многомерного анализа данных. Пользователь имеет возможность экспортировать данные в электронные таблицы для дальнейшего анализа средствами специализированных статистических пакетов.

Содержащиеся в системе атрибуты организуются иерархически в виде *дерева атрибутов*. Каждому узлу дерева атрибутов могут соответствовать данные, собранные в определенном разрезе. Также в этом дереве могут присутствовать вспомогательные узлы, которым не сопоставлены данные.

Каждый разрез характеризуется своим набором характеристик, по которым собираются данные. Такие характеристики называются *измерениями*. Примерами измерений являются: территории, отрасли, формы занятости населения и т.д. Дерево атрибутов также рассматривается в системе, как специальное измерение, от которого зависят все значения.

Другим специальным измерением, от которого зависит большинство значений, являются *интервалы времени*, поскольку данные, как правило, собираются с привязкой к конкретному интервалу времени. В системе поддерживаются следующие интервалы времени кратные месяцу: год, полугодие, квартал, месяц.

Если, например, данные по атрибуту "Экономически активное население" собираются в разрезе "по территориям", то они будут зависеть от измерения "Территории" (Населенные пункты), а также от специальных измерений "Атрибуты" и "Интервалы времени". Иначе говоря, в этом случае в системе могут содержаться данные о значениях атрибута "Экономически активное население" для всевозможных комбинаций значений измерений ("Населенные пункты", "Интервалы времени"). Зависимость значения от измерения "Атрибуты" служит для хранения данных по различным атрибутам в одной таблице. На рис.1 представлена пространство измерений с данными (куб данных).

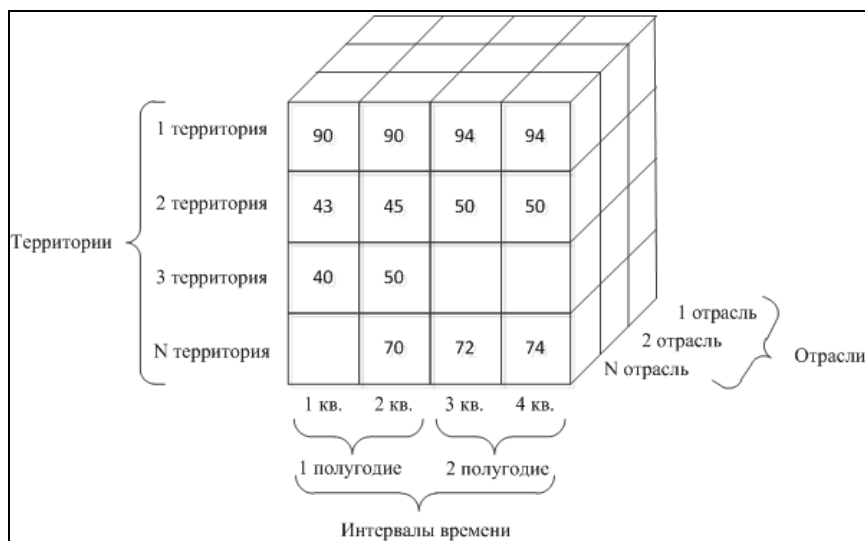


Рис. 1. Значения в пространстве измерений.

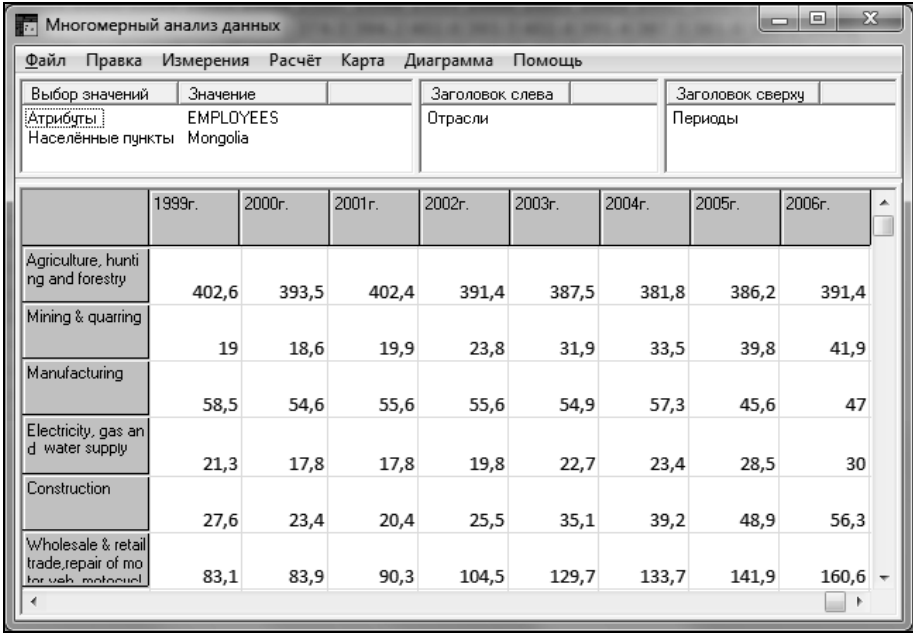
Каждая комбинация значений измерений может рассматриваться как точка в многомерном пространстве, которой в системе может быть сопоставлено числовое значение.

Сами измерения обычно имеют более сложную структуру, чем просто линейно упорядоченное множество. Как правило, они, так же, как и атрибуты, организуются в виде дерева. Так, территории собираются в дерево по уровню подчиненности (например, для Монголии это страна/аймак/район), а отрасли – по специализации (например, промышленность/сельское хозяйство/услуги).

Значения атрибутов хранятся в таблицах фактов. В такой таблице должны содержаться поля с кодами значений всех измерений, от которых зависит атрибут, а также числовое поле со значением атрибута. Значения атрибутов, собираемых в одном разрезе, удобно хранить в одной таблице, а для разрезов с разными количествами влияющих измерений необходимо использовать разные таблицы значений атрибутов. Таким образом, разные таблицы можно представить как киоски данных в концепции хранилища данных.

Интерфейс программы MDAttr

Главное окно (рис. 2) разделено на 2 основные части. В верхней части находится три панели со списками измерений; в нижней части находится таблица, в которой отображаются значения из хранилища данных в соответствии с выбранными в верхней части измерениями.



The screenshot shows the main window of the MDAttr program, titled "Многомерный анализ данных". The interface includes a menu bar with options: "Файл", "Правка", "Измерения", "Расчёт", "Карта", "Диаграмма", "Помощь". Below the menu bar are three panels for selecting values, attributes, and dimensions. The "Выбор значений" panel shows "EMPLOYEES" and "Населённые пункты Mongolia". The "Заголовок слева" panel shows "Отрасли". The "Заголовок сверху" panel shows "Периоды". The main data table has columns for years from 1999 to 2006 and rows for various economic sectors.

	1999г.	2000г.	2001г.	2002г.	2003г.	2004г.	2005г.	2006г.
Agriculture, hunting and forestry	402,6	393,5	402,4	391,4	387,5	381,8	386,2	391,4
Mining & quarrying	19	18,6	19,9	23,8	31,9	33,5	39,8	41,9
Manufacturing	58,5	54,6	55,6	55,6	54,9	57,3	45,6	47
Electricity, gas and water supply	21,3	17,8	17,8	19,8	22,7	23,4	28,5	30
Construction	27,6	23,4	20,4	25,5	35,1	39,2	48,9	56,3
Wholesale & retail trade, repair of motor vehicles, motorcycles	83,1	83,9	90,3	104,5	129,7	133,7	141,9	160,6

Рис. 1. Главное окно программы MDAttr.

Списки измерений позволяют разделить все измерения на три группы:

- на панели *отдельных значений* находятся измерения, для которых пользователь выбирает всего одно значение (факт), по которому будут получены данные из хранилища данных;
- на панели *заголовков слева* находятся измерения, выбранным значениям которых сопоставляются строки таблицы;
- на панели *заголовков сверху* находятся измерения, выбранным значениям которых сопоставляются столбцы таблицы.

В списке отдельных значений кроме наименований измерений отображается столбец с выбранными для измерений значениями.

Если на панели заголовков слева находится несколько измерений, то будут созданы строки таблицы значений для всех возможных комбинаций выбранных значений этих измерений (т.е. для декартова произведения множеств выбранных значений отдельных измерений). При этом, чем ниже в списке находится измерение, тем чаще меняются его значения в ходе перемещения по строкам.

Аналогично, если на панели заголовков сверху находится несколько измерений, то будут созданы столбцы таблицы значений для всех возможных комбинаций выбранных значений этих измерений. При этом, чем ниже в списке находится измерение, тем чаще меняются его значения в ходе перемещения по столбцам.

Таким образом, в каждой ячейке таблицы значений отображаются данные, соответствующие:

- значениям измерений из списка заголовков слева, сопоставленным строке ячейки;
- значениям измерений из списка заголовков сверху, сопоставленным столбцу ячейки;
- значениям измерений, выбранным в списке отдельных значений.

Выбранные значения измерения могут быть организованы в виде дерева, при этом в таблице значений узлы дерева, которые еще не раскрыты, обозначаются символом [+], а раскрытые узлы – символом [-]. При раскрытии/закрытии узла дерева, соответствующего измерению, расположенному не в первой строке списка заголовка, этот узел раскрывается и во всех остальных деревьях этого измерения.

Используя окно выбора значений иерархического измерения (рис. 3), пользователь может выбрать отдельное значение для измерения, находящегося на панели выбора отдельных значений, а также сформировать дерево или список значений для отображения в заголовке таблицы.

Окно значений измерения делится горизонтальной линией на две части. В верхней части окна находится *дерево значений* иерархического измерения. Здесь отображается дерево с названиями значений, столбец с их числовыми кодами, а также, при наличии таковых, столбцы со значениями других полей таблицы измерения, в которых могут содержаться значения дополнительных характеристик, связанных со значением измерения. Примеры дополнительных характеристик: "Единица измерения" и "Таблица значений" в дереве атрибутов.

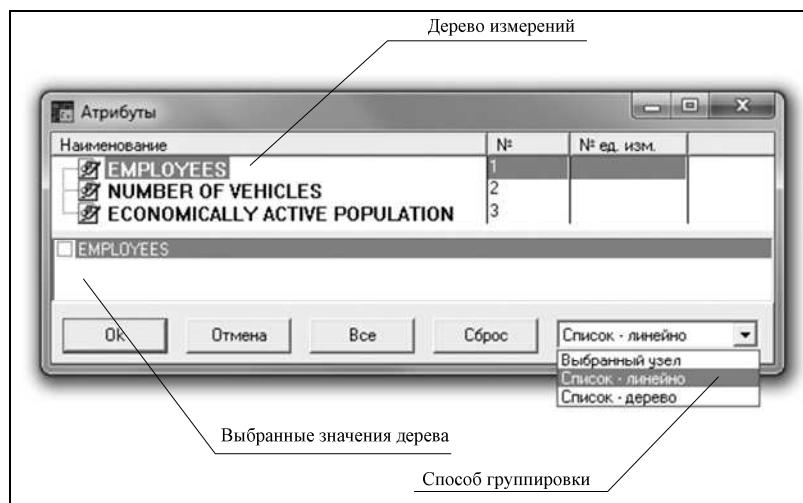


Рис. 3. Выбор значений измерения.

В нижней половине окна отображается *список выбранных значений*. Если этот список пуст, то, независимо от выбора способа группировки, выбранным считается отдельное значение, соответствующее текущему узлу дерева значений измерения.

Пользователь имеет возможность помещать интересующие его значения в список выбранных значений посредством буксировки и при помощи рассматриваемого окна отобразить для отображения в таблице интересующие его фрагменты дерева значений измерения.

В системе MDAttr предусмотрены возможности:

- выбора необходимых для просмотра интервалов времени (рис. 4), а также, если это требуется, входящие в их состав подинтервалов;
- перемещения измерения между списками и переупорядочивание их внутри списков, при этом изменяется табличное представление данных;
- редактирования значения атрибутов, отображаемые в ячейках таблицы значений;
- выделения/копирования/вставки/удаления прямоугольной области ячеек таблицы значений.

Текущее состояние таблицы значений, включая состояние раскрытия узлов в деревьях заголовков, можно экспортировать в MS Excel файл с расширением XLS.

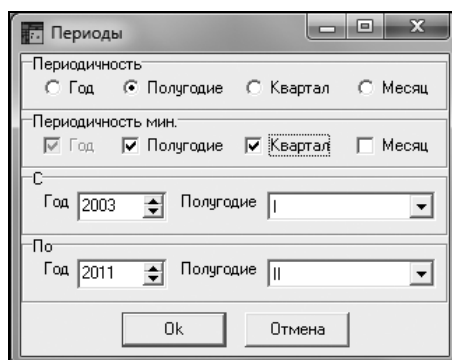


Рис. 4. Выбор интервалов времени.

Администратор системы имеет возможность настроить ее для отображения различных комбинаций измерений и таблиц значений атрибутов. При этом должны соблюдаться определенные соглашения:

- Все значения измерений, должны иметь уникальный числовой код, для хранения которого должно быть достаточно 4-х байт. Следует использовать коды от 1 до 2147483647=0x7FFFFFFF. Это позволяет оптимизировать внутреннее представление информации в клиентской программе.
- Значения интервалов времени должны кодироваться целым числом по следующей формуле:

$$H_i = T0_m * 12 + (12 - dT_m),$$

где H_i обозначает код интервала времени; $T0_m$ – начало интервала в месяцах (от $T0_m = \text{Год} * 12 + \text{№ Месяца}$, при этом январю соответствует 0); dT_m – протяженность интервала времени в месяцах (год – 12, полугодие – 6, квартал – 3, месяц – 1).

Такой способ кодирования интервалов времени позволяет получить их естественное упорядочивание при сортировке их кодов в порядке возрастания: коды полугодий будут следовать за кодом года, код

квартала – за кодом полугодия и т.д., а также избежать использования отдельной таблицы для хранения информации об интервалах времени.

- Значения атрибутов должны храниться в числовых полях.
- Таблица атрибутов должна быть организована, как иерархическое измерение.
- В таблице атрибутов должно присутствовать поле с наименованием `id_ValTbl`, в котором для имеющих значения атрибутов должны быть записаны коды соответствующих таблиц значений атрибутов из таблицы `m_ValTbl`.

Система может быть настроена на использование любых таблиц, созданных с соблюдением описанных соглашений.

Системы анализа многомерных статистических данных социально-экономического положения республики Монголия на основе технологии метаописаний

Для решения приоритетных задач социально-экономического развития территорий Монголии, а также повышения эффективности работы территориальных органов управления создается информационная система, которая должна проводить многомерный анализ, расчеты по оценке развития территории, ранжировать территории по разным локальным и интегрированным критериям.

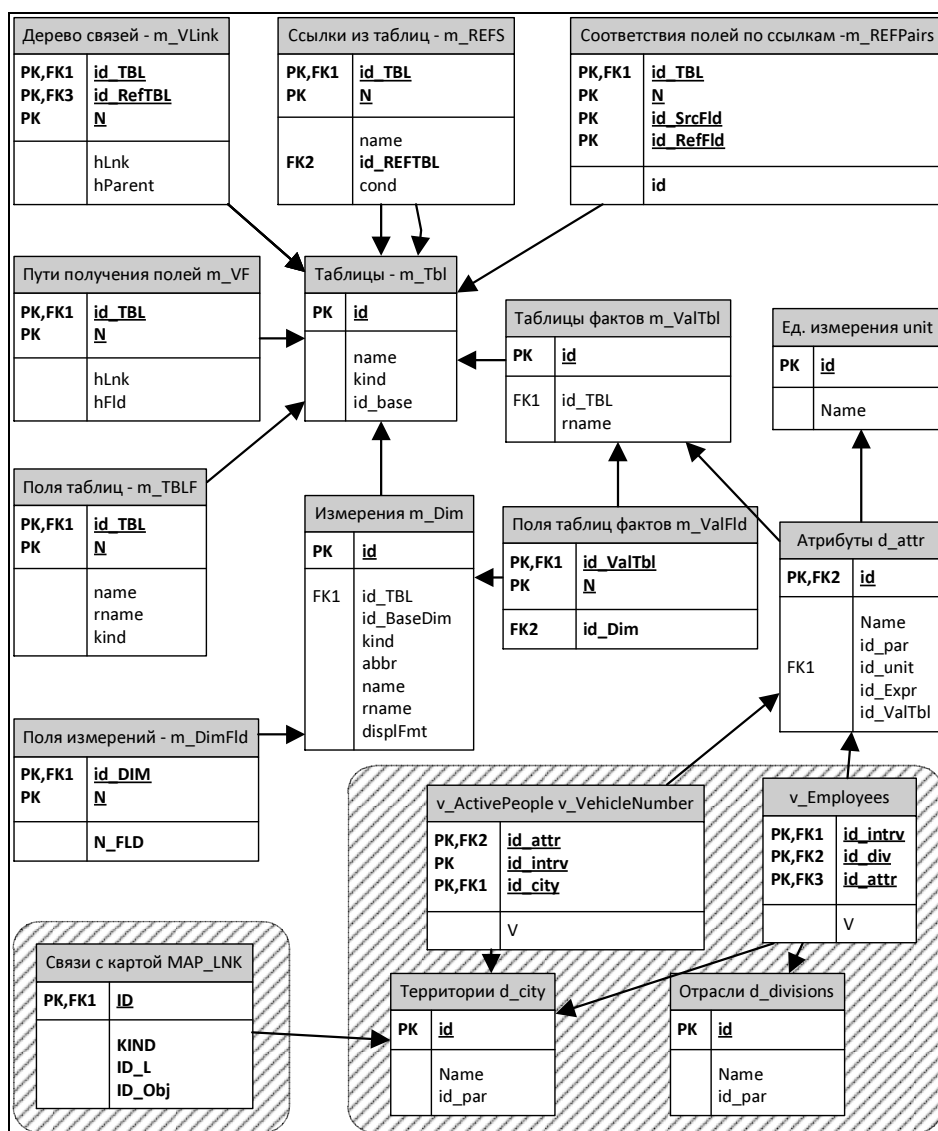


Рис. 5. Фрагмент модели данных хранилища, реализующей технологию метаописаний.

Рассмотрим фрагмент модели данных хранилища статистических данных социально-экономического положения республики Монголия (рис. 5). Таблицы, находящиеся на заштрихованной области, относятся к предметной области и зависят от нее. Их количество и они сами изменяются от одной предметной области к другой. Остальные таблицы являются обязательными, на их основе работает система MDAAttr.

Имеется информация о количестве транспортных средств и экономически активном населении собранной в разрезах времени и территории и имеется информация о работающем населении в разрезе отраслей специализации в времени. Тогда можно хранить информация об иерархическом измерении

"Территории" в таблице d_city, информацию об отраслях в таблице d_divisions, информацию о значениях экономически активного населения и количестве транспортных средств в таблице v_ActivePeople-v_VehicleNumber, информацию о занятости в таблице v_Employees. В таблице d_attr хранить информация об атрибутах, а в таблице unit - информацию о единицах измерений. Надо отметить, что поля id_intrv хранит интервал времени непосредственно вместо ссылки, а поле V численное значение. Некоторые статистические данные для системы были взяты из National statistical office of Mongolia [8].

Чтобы система MDAAttr функционировала необходимо составить метаописания для этих таблиц. На первом шаге следует заполнить таблицу m_tbl, создав записи для всех таблицы, используемой в системе. Затем для каждой записи из m_tbl заполнить информацию обо всех полях в таблице m_tblf. Связи между таблицами записать в таблицу m_refs, а соответствие полей, задаваемое ссылкам, в таблицу m_refspair. Для каждого представления должна присутствовать информация в таблицах m_VF и m_VLink. После того, как описаны все таблицы, можно описать измерения, информацию о которых нужно поместить в таблицы m_dim и m_dimfld для измерений и их полей соответственно. Кроме таблиц с описаниями измерений, надо заполнить таблицы m_valtbl и m_valfld метаинформацией о таблицах фактов (значений атрибутов). В таблице атрибутов должно присутствовать поле id_ValTbl, в котором должен содержаться код таблицы фактов из таблицы m_ValTbl, используемый для хранения этого атрибута.

Заключение

Предлагаемая система решает важные задачи интеграции и анализа показателей социально-экономического развития территорий Монголии и позволит повысить эффективность работы территориальных органов управления. В настоящее время ведется разработка инструмента позволяющего визуально создавать структуру и заполнять метаописания, наполнять данными хранилище, также ведется адаптация на монгольский язык данной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 11-07-92204-Монг_а, 11-07-00426-а), проекта ОНИТ СО РАН №3 2009-2011 гг. и Программы интеграционных исследований СО РАН (проект № 121 на 2009-2011 гг.).

Литература

1. Inmon W. Building the Data Warehouse. Wiley, 2005. 543 с.
2. Введение в многомерный анализ. <http://habrahabr.ru/blogs/sql/126810>
3. Kimball R., Caserta J. The Data Warehouse ETL Toolkit: Practical Techniques for Extracting, Cleanin. Wiley, 2004. 528 p.
4. Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T. Providing OLAP (On-line Analytical Processing) to User-Analysts: An IT Mandate. Codd & Date Inc., 1993.
5. Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных OLAP и Data Mining. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
6. Бычков И.В., Гаченко А.С., Ружников Г.М. и др. Внедрение современных информационных технологий в региональных проектах // Вестн. НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2008. Т. 6, вып. 1. С.15-24
7. Бычков И.В., Фереферов Е.С., Хмельнов А.Е. Метаописание баз данных как основа интеграции информационно-справочных систем и ГИС // Вычисл. технологии 2007. Т. 12, № 5.
8. National statistical office of Mongolia. <http://www.nso.mn/v3>

Информационная система для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии

А.П. Григорюк, Л.П. Брагинская

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

1. Введение

Современные веб-технологии, известные как технологии веб 2.0, позволяют не просто лучше обслуживать информационные потребности пользователя сети, но и активно вовлекают его во взаимодействие - как с другими пользователями, так и с самими информационными ресурсами. Для научного сообщества социальные технологии веб 2.0 представляют особый интерес. Они позволяют расширить формат профессионального взаимодействия, выводят его на глобальный уровень, стимулируют творческие способности каждого из участников процесса и - что самое существенное - они отвечают традициям научного сообщества, в котором всегда была важна взаимная оценка коллег и признание ими достигнутых результатов.

Инициатива исследовательских организаций по организации открытого доступа к результатам исследований активно поддерживается международным научным сообществом [7].

В настоящее время все большее развитие получают специализированные (для определенной предметной области) информационные системы, обеспечивающие доступ к научным знаниям, включая научные публикации, научные отчеты, базы данных, вычислительные ресурсы, нормативные и другие документы. Эти системы предназначены для таких категорий пользователей, как ученые и эксперты (доступ к научным результатам, научные коммуникации), преподаватели и студенты (образовательный процесс). Как отмечается в [6], процессы развития таких информационных систем создают особую виртуальную среду для научных исследований. В этих процессах можно выделить три логически связанные компоненты:

1. развитие программно-технических средств поддержки исследований (новый инструментарий);
2. использование новых инструментальных средств для совершенствования методов работы исследователей и их профессиональных взаимодействий (новые практики);
3. повышение эффективности организационных форм научно-исследовательской деятельности посредством использования нового инструментария и новых методов работы (новая форма организации сообществ исследователей).

В данной работе на примере виртуальной рабочей среды для поддержки теоретических и экспериментальных исследований в области активной сейсмологии проиллюстрировано использование всех перечисленных выше механизмов для организации эффективного взаимодействия и доступа к научной информации исследователей, работающих в конкретной предметной области.

2. Постановка задачи

Активная сейсмология является новым направлением в геофизике, в котором для изучения строения земной коры и исследования геодинамических процессов в зонах землетрясений и вулканов используются управляемые источники сейсмических волн - мощные сейсмические вибраторы, гидромеханические и электромагнитные импульсные источники [1]. В последние годы к методам активной сейсмологии так же относят экспериментальные работы, в которых регистрируется сейсмическое поле природных источников по технологии, определенной конкретной задачей геофизики, например сейсмоэмиссионная томография вулканических структур с использованием сейсмического шума из активной области вулкана. В 2010 г. был проведен уникальный эксперимент по регистрации сейсмического шума методом «сейсмической антенны» в штольне Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Последние три десятилетия работы по активной сейсмологии проводятся в России, Японии, Китае, США, европейских странах. В России в рамках экспериментальных исследований проводился вибросейсмический мониторинг литосферы в Алтае-Саянском регионе, Байкальской рифтовой зоне и Таманской грязевулканической провинции. В Японии с вибросейсмической системой ACCROSS проводится мониторинг сейсмоопасных и разломных зон земной коры. В области активной сейсмологии накоплен большой объем информации по всем составляющим метода, включая вопросы теории метода, создания управляемых источников, результатов экспериментальных работ, методов математического моделирования, который представлен в разрозненных источниках - статьях, монографиях, отчетах, на сайтах институтов и др.

Разработанная авторами доклада информационная система обеспечивает структурирование этой информации и доступ к ней в рамках одного интернет-ресурса для комплексной поддержки научных исследований в области активной сейсмологии.

НИС «Активная сейсмология» существенно расширила круг исследователей, использующих экспериментальные данные для развития методов обработки и интерпретации вибросейсмических данных, математического моделирования и т.п.

3. Управление экспериментальными данными

ИВМиГ СО РАН участвует в экспериментах по активному мониторингу ли, начиная с 1995 г. В результате этой работы был накоплен уникальный архив данных полевых экспериментов, включающий архив файлов волновых форм и сопутствующей информации (тип сейсмического источника, параметры излучаемого им сигнала, параметры регистратора, географические координаты источника и регистратора и т.д.). Для доступа к этому экспериментальному материалу была разработана информационно-вычислительная система (ИВС) «Вибросейсмическое просвечивание Земли» [2]. ИВС обеспечивает выполнение следующих основных функций:

- получение из базы данных подробной информации по любому из проведенных экспериментов;
- индексный и параметрический поиск сейсмотрасс одновременно по 18 параметрам вибропросвечивания;
- автоматическое построение по результатам поиска интерактивных карт с обозначенными на них сейсмическими источниками и регистраторами;
- интерактивный анализ сейсмических сигналов во временной, частотной, частотно-временной и пространственной областях. Анализ осуществляется в режиме онлайн с отображением результатов в веб-браузере пользователя.

По своей структуре и функциям ИВС «Вибросейсмическое просвечивание Земли» в рамках современной терминологии может быть отнесена к центрам научных данных. Стиль работы в таких центрах состоит в посылке запросов приложениям, выполняемым на сервере, и получении ответов, а не в массовом копировании необработанных данных на локальный компьютер для дальнейшего анализа [9].

Вычислительная подсистема представляет собой приложение, выполняемое непосредственно в среде операционной системы сервера. Для обеспечения необходимого для on-line режима быстрodeйствия при обработке данных ресурсоемкие вычислительные процедуры могут выполняться программно-аппаратным модулем на основе архитектуры CUDA. В модуле применяются графические процессоры (GPU) и математические библиотеки компании NVIDIA [3]. За счет многоядерной параллельной архитектуры GPU превосходят по быстрodeйствию процессоры общего назначения (CPU) на 1-3 порядка при выполнении большинства вычислительных процедур.

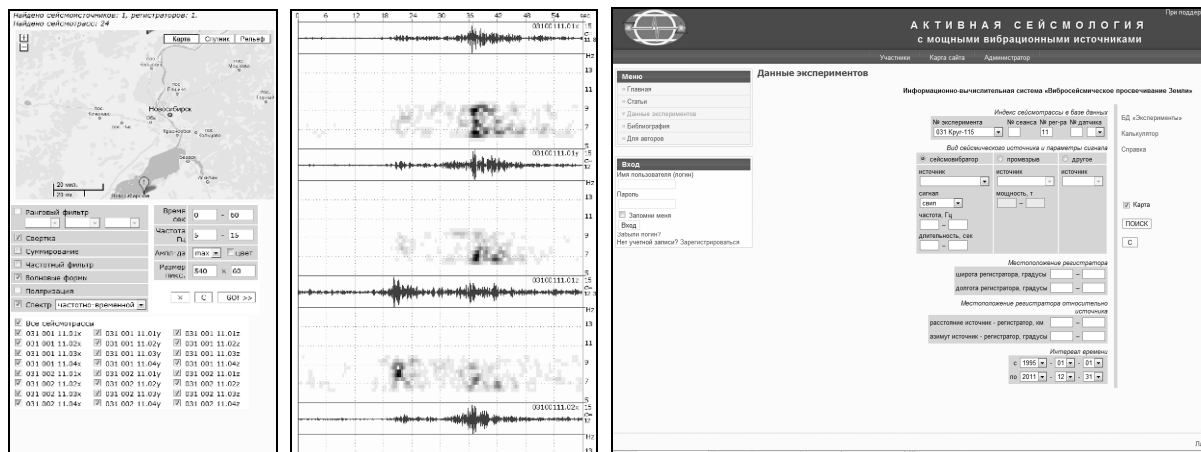


Рис. 1. Поисковые формы ИВС и результаты анализа.

Концептуальные основы, заложенные при разработке ИВС, позволяют создавать аналогичные системы управления экспериментальными данными в любой предметной области.

Предоставление в режиме онлайн экспериментальных данных и предлагаемые сервисы ИВС являются привлекательной особенностью предлагаемой научно-информационной системы.

На наш взгляд, активное формирование круга пользователей Интернет-ресурса «Активная сейсмология» происходит благодаря заинтересованности коллег в доступе к данным полевых экспериментов.

4. Управление геопространственными данными

Во многих научных областях (геофизика, экология и т.д.) исследователи имеют дело с пространственно обусловленными данными или геопространственными данными. Поэтому архитектура ИВС должна предусматривать подсистему управления геоданными и картографическую подсистему.

Большинство современных СУБД, как коммерческих, так и свободно распространяемых, поддерживают класс пространственных данных непосредственно или с помощью специальных

расширений. Картографические сервисы, в частности web-сервисы до недавнего времени строились преимущественно на основе специализированного серверного ПО, позволяющего публиковать в сети Интернет карты, сопровождаемые базовым ГИС-инструментарием. Однако, в последние годы в Интернете все большее распространение получают гибридные ГИС. В таких системах геоданные из прикладной базы данных интегрируются с картографическим сервисом, предоставляемым специализированным web-сервером. На сегодняшний день наиболее развитым картографическим web-сервисом является Google Maps компании Google [4, 5]. Сервис базируется на данных дистанционного зондирования (спектрозональные снимки со спутников Landsat, SPOT, Quickbird с разрешением до 0.68м), совмещенных с топографическими картами в проекции Меркатора. Компания Google предоставляет пользователям интерфейс Google Maps API в виде классов объектов JavaScript для генерации карт и нанесения на них собственных маркеров, контуров, а также готовых слоев в формате KML. Данные для отображения могут находиться как непосредственно в коде web-страниц, так и во внешних XML и KML файлах. Схема взаимодействия сервера ИВС, сервера Google Maps и клиентского браузера показана на рис. 2.

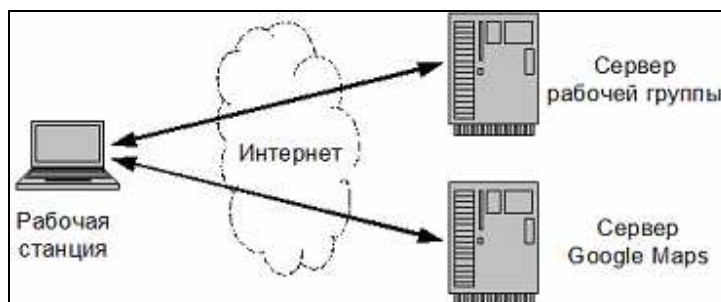


Рис. 2. Структура гибридной ГИС.

5. Управление публикациями и организация социальной сети

Как уже отмечалось, Интернет-ресурс, обеспечивающий функционирование виртуальной рабочей среды, основан на принципах веб 2.0, согласно которым пользователи принимают непосредственное участие как в создании контента (содержимого ресурса), так и в организации научных коммуникаций. Для создания подобных ресурсов существует специализированное серверное программное обеспечение, называемое системами управления содержимым — CMS (Content Management System).

В результате сравнительного анализа различных систем управления содержимым было решено строить Интернет-ресурс на базе CMS Joomla [5]. Данная CMS распространяется по лицензии GNU/GPL (свободное программное обеспечение) и ориентирована в первую очередь на создание сайтов электронных публикаций. Для работы Joomla требуется PHP-интерпретатор и СУБД MySQL — также свободное программное обеспечение. Наличие большого количества дополнительных Joomla-компонентов позволяет расширять функциональность ресурса в соответствии с требованиями современных информационно-коммуникационных технологий. Ниже перечислены дополнительные Joomla-компоненты, которые были использованы при создании Интернет-ресурса.

Community Builder — компонент для управления пользователями и организации связей между ними, используется для создания и поддержки онлайн-сообществ. Основные функции компонента:

- расширенное управление регистрацией пользователей, создание дополнительных полей в профайле, например, списка опубликованных статей;
- организация контактов между пользователями, создание рабочих групп;
- поддержка систем личных сообщений (PMS), почтовых рассылок, блогов пользователей.

J!Research — компонент для организации на сайте библиографического каталога научных публикаций. Имеется возможность вставлять в материалы сайта ссылки на записи каталога и автоматически генерировать список литературы. Компонент позволяет пользователям добавлять записи как через веб-форму, так и импортировать библиографическую базу данных из bib-файла. Предусмотрен импорт/экспорт из форматов BibTex, MODS, RIS. Компонент обеспечивает поиск, сортировку, выборку по любому из полей: автор, издание, год публикации и т.п.

JComments — компонент позволяет пользователям не только оставлять комментарии к различным материалам, размещенным на сайте, но и разворачивать обсуждение в формате форума.

Mime Tex — компонент для включения в размещаемые на сайте материалы математических выражений в формате LaTeX.

Attachments — компонент для загрузки и публикации материалов в формате PDF. Таким образом, пользователь может в онлайн-редакторе набрать часть статьи или краткую аннотацию, а полный текст статьи или дополнительные материалы «прикрепить» в виде файла PDF.

Пользователи Интернет-ресурса «Активная сейсмология» имеют возможность в интерактивном режиме публиковать статьи и другие материалы в одном из следующих разделов:

- Вибросейсмические технологии;

- Математическое моделирование;
- Экспериментальная геофизика;
- Вулканология и сейсмология;
- Технические средства;
- Информационные технологии.

Структурная схема НИС «Активная сейсмология» представлена на рис. 3.

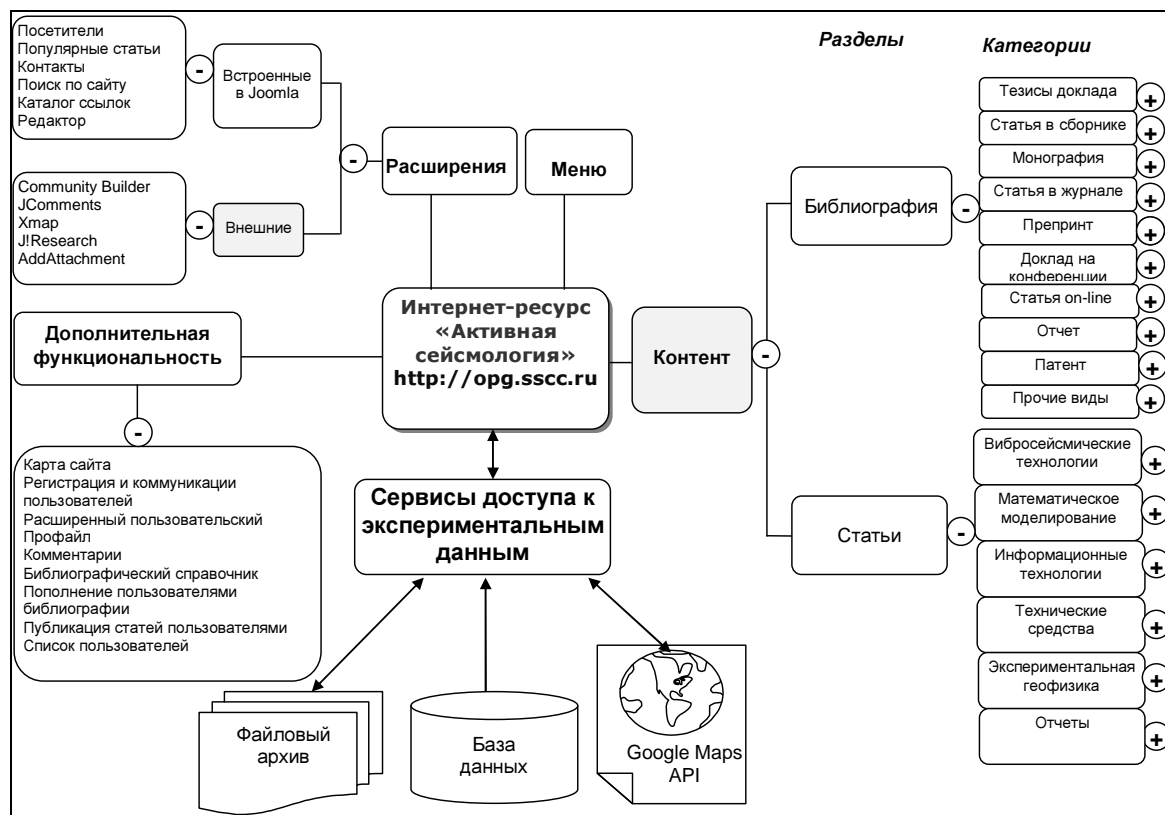


Рис.3. Структурная схема НИС «Активная сейсмология».

6. Актуальность, полнота, достоверность происхождения документов

Основными пользователями НИС «Активная сейсмология» являются специалисты, работающие в вибросейсмической тематике или смежных областях. На сегодняшний день более 40 зарегистрированных участников публикуют свои статьи и участвуют в обсуждении работ коллег. Можно отметить, что в этом списке представлены все основные российские научные учреждения, работающие в данном направлении, что позволит обеспечить полноту и актуальность предоставляемой информации.

Особенно важным представляется участие в работе НИС ученых, которые являются основателями метода активной сейсмологии. Опубликованные ими статьи дают полное представление о теоретических основах вибросейсмического метода.

В разделе «Математическое моделирование» опубликован ряд работ, в которых приводятся результаты обработки данных вибросейсмических экспериментов, сравниваются результаты численного и натурального экспериментов.

Пользователями НИС являются не только ученые институтов СО РАН, но и ДВО РАН, Камчатской геофизической службы, КубГУ, ИФЗ РАН и т.д.

В разделах «Вулканология и сейсмология» и «Экспериментальная геофизика» представлены результаты исследований, многие из которых напрямую не связаны с методом активной сейсмологии. Общим является предмет исследования — сейсмичность Байкальской рифтовой зоны, Таманской грязевулканической провинции, вулкана Эльбрус и т.п.

НИС «Активная сейсмология» поддерживает два вида ввода данных: интерактивный ввод данных пользователями и административный ввод данных. Для интерактивного ввода проблема достоверности происхождения информации решается ограничением ввода документов только аутентифицированными пользователями. Администрация Интернет-ресурса оставляет за собой право удалять материалы, не соответствующие объявленной тематике.

7. Сравнение с зарубежными и российскими аналогами

Исторически одним из первых научных Интернет-ресурсов, имеющих функции социальной сети может считаться научная библиотека Public Library of Science – PloS (www.plosone.org), созданная в 2003

году в США в ответ на отказ издательств научных журналов открыть свои архивы. Одному из основателей этого ресурса принадлежит характерное высказывание: «Наука развивается не только потому, что ученые делают эксперименты, но и потому, что они обсуждают эти эксперименты». Российским аналогом проекта является Соционет (www.socionet.ru), который на основе открытых стандартов организует процессы обмена знаниями в области гуманитарных наук.

Примером масштабной научно-образовательной сети, использующей самые современные Интернет-технологии может служить ресурс www.academia.edu. В последние несколько лет предпринимаются попытки создания аналогичных ресурсов, ориентированных на российских пользователей: www.scipeople.ru, www.science-community.org/ru, www.allscience.ru и другие.

Основным отличием научной информационной системы «Активная сейсмология» от перечисленных выше «глобальных» ресурсов является ее ориентированность на конкретную область исследований. Мы полагаем, что находясь в пространстве узкоспециализированной научной сети, пользователи с большей вероятностью могут рассчитывать на налаживание связей и общение с коллегами, на получение комментариев и оценок от экспертов в данной области. Чем менее публично сообщество, тем сильнее вовлеченность участников — истина, хорошо известная исследователям социальных сетей.

Литература

1. Цибульчик Г.М. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Издательства СО РАН, 2004.
2. Григорюк А.П., Брагинская Л.П. Управление данными вибросейсмического мониторинга // Сб. матер. Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2007». Т. 3. Новосибирск: СГГА, 2007.
3. CUDA Zone. http://www.nvidia.ru/object/cuda_home_new_ru.html
4. Google Maps API Documentation. <http://www.google.com/apis/maps/documentation>
5. Григорюк А.П., Брагинская Л.П. Опыт веб-картографирования на основе сервиса Google Maps // Сб. матер. Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2008». Т. 3. Новосибирск: СГГА, 2008.
6. Лопатенко А.С. Современные Научные Информационные Системы. Перспективы использования // <http://derpi.tuwien.ac.at/~andrei/papers/dl2001-1.htm>
7. Паринов С.И. Онлайн-будущее науки // <http://infosoc.ru/2007/thes/part1/Parinov.pdf>
8. Медведев М.М. Наука 2.0 // http://www.strf.ru/science.aspx?CatalogId=222&d_no=13726
9. Gray J., Liu D.T., Nieto-Santisteban M. et al. Scientific Data Management in the Coming Decade // SIGMOD Record. 2005. Vol. 34, N 4.

Интеграция разнородных данных на основе понятия электронного документа в системе распределенных информационных хранилищ

А.М. Гудов, В.В. Мешечкин

Кемеровский государственный университет

Мониторинг окружающей среды представляет собой комплексную систему наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов [1]. Собранные в ходе мониторинга информация необходима для того, чтобы, по возможности, снизить ущерб, причиняемый человеческому обществу неблагоприятными природными явлениями и техногенными катастрофами и, что особенно важно, уменьшить риск человеческих потерь.

Мониторинг может осуществляться различными службами и на разном уровне (локальном, региональном, национальном, глобальном), итогом чего являются значительные объемы разноформатных, часто не скоординированных между собой, междисциплинарных данных. Результативность мониторинга в значительной степени зависит от количества и качества собираемой информации, которая должна включать как можно более подробные сведения о пространственно-временной изменчивости показателей качества воздуха, воды, биоты и пр., о видах и объемах хозяйственной деятельности, в том числе данные об источниках загрязнения. В дополнение к системе получения исходной информации должна быть разработана система ее обработки, проверки и представления потребителям.

При совместной обработке различной информации важную роль играет задача интеграции обрабатываемых данных и результатов исследования, получаемых в ходе мониторинга окружающей среды. Определенные возможности при ее решении могут представлять системы электронного документооборота (СЭД), предназначенные для автоматизации управления движением электронных документов (ЭД) разного типа. Определение ЭД в действующих на текущий момент стандартах и рекомендациях гораздо шире, чем принято в делопроизводстве. Понятие ЭД используется для интеграции разнородных данных при их обработке в информационных системах различного назначения. Актуальной проблемой в таком случае является распределение документов по информационным хранилищам по возможности оптимальным способом с точки зрения некоторого критерия. Одним из подходов к выбору такого критерия является экономический, заключающийся в минимизации суммы затрат на хранение, передачу, поиск и обновление электронного документа [2]. Формализации этого подхода посвящена данная работа.

Определим основной объект исследования «электронный документ» как информационную пару $d_i = \{C_{d_i}, M_{d_i}\}$, обрабатываемую и циркулирующую в информационной среде, где C_{d_i} – содержимое ЭД, M_{d_i} – метаданные ЭД. Под содержимым понимается информационное наполнение ЭД, которое представляется в виде вложенного файла или набора файлов произвольного типа и размера, а также в виде ЭД или набора ЭД. Метаданные – описание ЭД, однозначно его идентифицирующее. Такое определение позволяет обрабатывать отдельно метаданные и содержимое документа.

Использование ЭД для интеграции и обмена информацией между прикладными системами (не только между СЭД) позволяет существенно расширить функциональные возможности интеграционной платформы на базе СЭД, поскольку она уже настроена на работу с электронными документами и обладает набором сервисов для поиска, генерации, обработки документов через их метаданные. Описание ЭД в виде стандартизованного XML-сообщения позволит взаимодействовать со специализированными системами, такими как СЭД и различными реализациями систем на базе SOA и ESB. Однако такая система должна обладать рядом дополнительных свойств, осуществляющих информационное обеспечение информационно-ориентированного, сервисно-ориентированного и процессно-ориентированного принципов интеграции, присущих системам управления бизнес-процессами.

На основании стандартов, используемых в системах управления документами, выделяются следующие основные этапы жизненного цикла (ЖЦ) документа: создание (рождение), становление (работа), публикация (размещение в системе), архивирование (размещение в архиве системы), уничтожение документа. В работе определены следующие этапы ЖЦ:

- создание ЭД (в ручном или автоматическом режиме) – определение множества метаданных документа вместе с его содержимым;
- становление – групповая или индивидуальная работа с ЭД, выполняемая на уровне СЭД с использованием механизмов маршрутизации и выполнения заданий;
- публикация – размещение ЭД в системе хранилищ или информационных ресурсах (сайты, порталы, файловая система), выполнение заданий (поручений), связанных с документом, без возможности изменения метаданных и содержимого;

- архивирование – размещение документа в системе информационных хранилищ с обеспечением поиска по метаданным и/или его содержанию, поддержка возможности извлечения из системы хранилищ;
- уничтожение – удаление документа из системы хранилищ.

Проблема, связанная с обеспечением этапа публикации и архивирования ЭД, заключается в обеспечении оптимального распределения ЭД в системе информационных хранилищ. Предложено решение проблемы на основе задачи оптимизации стоимости документопотоков с использованием «архитектурного» подхода (анализ использования различных архитектурных решений при проектировании системы) на основе интегрального экономического критерия.

Пусть при построении интегрального критерия учитывается [3]:

- стоимость хранения информации в распределенном информационном хранилище (ИХ);
 - стоимость получения данных из ИХ;
 - стоимость получения данных пользователем из функционирующих информационных систем (ИС).
- Стоимость хранения документов в ИХ H_i ($i = 1, \dots, n$) может быть выражена как

$$S^1 = \sum_{i=1}^N s_i^1 \sum_{j=1}^{n_i} (m_{ij} v'_{ij} + c_{ij} v''_{ij}), \quad (1)$$

где s_i^1 – стоимость хранения 1 ед. информации в H_i , v'_{ijk} – объем M_j^k d_j в H_i , v''_{ijk} – объем C_j^k d_j в H_i .

Введем индикаторы m_{ijk} и c_{ijk} , показывающие, из каких метаданных и содержимого состоит d_j в H_i :

$$m_{ijk} = \begin{cases} 1, & M_j^k \in H_i, \\ 0, & M_j^k \notin H_i, \end{cases} \quad c_{ijk} = \begin{cases} 1, & C_j^k \in H_i, \\ 0, & C_j^k \notin H_i, \end{cases}$$

где M_j^k – k -е метаданное d_j , C_j^k – k -е содержимое d_j , $d_j = \{C_j^k, M_j^k\}$. Тогда

$$\begin{aligned} m_{ij} &= \{m_{ijk} \mid k = 1, \dots, n'_j\}, & c_{ij} &= \{c_{ijk} \mid k = 1, \dots, n''_j\}, \\ v'_{ij} &= \{v'_{ijk} \mid k = 1, \dots, n'_j\}, & v''_{ij} &= \{v''_{ijk} \mid k = 1, \dots, n''_j\}, \\ m_{ij} v'_{ij} &= \sum_{k=1}^{n'_j} m_{ijk} v'_{ijk}, & c_{ij} v''_{ij} &= \sum_{k=1}^{n''_j} c_{ijk} v''_{ijk}. \end{aligned} \quad (2)$$

Стоимость получения ЭД пользователем из H_i находится следующим образом:

$$S^2 = \sum_{i=1}^N \frac{s_i^2}{Q_i R_i} \sum_{j=1}^{n_i} \left[(m_{ij} v'_{ij} \eta_{ij}^m)^2 + m_{ij} c_{ij} (v'_{ij} \eta_{ij}^c + v''_{ij} \eta_{ij}^m) + (c_{ij} v''_{ij} \eta_{ij}^c)^2 \right], \quad (3)$$

где s_i^2 – стоимость получения 1 ед. информации из H_i , η_{ij}^m – частота обращений к метаданным документа, η_{ij}^c – частота обращения к содержимому ЭД, Q_i – частота запросов к H_i , R_i – пропускная способность канала связи для передачи ЭД между пользователем и хранилищем.

Стоимость получения документов из ИС, аналогично, может быть представлена формулой

$$S^3 = \sum_{i=1}^L \frac{s_i^3}{Q'_i R'_i} \sum_{j=1}^{l_i} \left[(m_{ij} v'_{ij} \mu_{ij}^m)^2 + m_{ij} c_{ij} (v'_{ij} \mu_{ij}^c + v''_{ij} \mu_{ij}^m) + (c_{ij} v''_{ij} \mu_{ij}^c)^2 \right], \quad (4)$$

где s_i^3 – стоимость получения 1 ед. информации от ИС I_i , μ_{ij}^m – частота обращения к метаданным документа в ИС за единицу времени, μ_{ij}^c – частота обращений к содержимому документа, l_i – количество электронных документов в I_i , Q'_i – частота запросов к I_i , R'_i – пропускная способность канала связи.

Окончательный вид критерия с учетом выражений (1) – (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} f(M, C) &= \omega_1 \sum_{i=1}^N s_i^1 \sum_{j=1}^{n_i} (m_{ij} v'_{ij} + c_{ij} v''_{ij}) + \omega_2 \sum_{i=1}^N \frac{s_i^2}{Q_i R_i} \sum_{j=1}^{n_i} \left[(m_{ij} v'_{ij} \eta_{ij}^m)^2 + \right. \\ &+ m_{ij} c_{ij} (v'_{ij} \eta_{ij}^c + v''_{ij} \eta_{ij}^m) + (c_{ij} v''_{ij} \eta_{ij}^c)^2 \left. \right] + \omega_3 \sum_{i=1}^L \frac{s_i^3}{Q'_i R'_i} \sum_{j=1}^{l_i} \left[(m_{ij} v'_{ij} \mu_{ij}^m)^2 + \right. \\ &+ m_{ij} c_{ij} (v'_{ij} \mu_{ij}^c + v''_{ij} \mu_{ij}^m) + (c_{ij} v''_{ij} \mu_{ij}^c)^2 \left. \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Матрицы $M = \{m_{ij} \mid i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_j\}$ и $C = \{c_{ij} \mid i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_j\}$ составляют набор переменных задачи. Определяемые элементами этих матриц объемы метаданных $V' = \{v'_{ij} \mid \forall m_{ij} \neq 0, \quad i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, n_j\}$ и содержания $V'' = \{v''_{ij} \mid \forall c_{ij} \neq 0, \quad i = 1, \dots, L, \quad j = 1, \dots, l_j\}$ являются известными значениями для каждого конкретного документа.

Полная постановка задачи имеет следующий вид:

$$f(M, C) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N (m_{ij} + c_{ij}) = r_j, \quad r_j = 1, \dots, N + L, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} (m_{ij} v'_{ij} + c_{ij} v''_{ij}) \leq \sum_{i=1}^n O_i, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{Q_i R_i} \sum_{j=1}^{n_i} \left[(m_{ij} v'_{ij} \eta_{ij}^m)^2 + m_{ij} c_{ij} (v'_{ij} \eta_{ij}^c + v''_{ij} \eta_{ij}^m) + (c_{ij} v''_{ij} \eta_{ij}^c)^2 \right] +$$

$$+ \sum_{i=1}^L \frac{1}{Q'_i R'_i} \sum_{j=1}^{l_i} \left[(m_{ij} v'_{ij} \mu_{ij}^m)^2 + m_{ij} c_{ij} (v'_{ij} \mu_{ij}^c + v''_{ij} \mu_{ij}^m) + (c_{ij} v''_{ij} \mu_{ij}^c)^2 \right] \leq T. \quad (9)$$

Соотношение (7) задает ограничение на количество копий r_j ЭД в различных хранилищах. Возможность хранения документов в хранилище ограничена объемом этого хранилища (8). Условие (9) отражает максимальный объем электронных документов, передаваемых по сетям передачи данных между пользователем, информационным хранилищем и информационной системой за период времени T .

В результате получается нелинейная задача дискретного целочисленного программирования, в которой переменные M и C являются булевыми (принимают значения из множества $\{0, 1\}$), а значения V' и V'' являются целыми числами (например, выражаются в мегабайтах).

Для решения этой задачи необходимо найти такое распределение m_{ij} и c_{ij} , при которых значение $f(M, C)$ в (6) становится минимальным для заданного набора коэффициентов при ограничениях (7)-(9).

Следует отметить, что в соответствии с принятой моделью ЭД значения метаданных представляют собой строго структурированные данные, а содержание – файлы произвольного формата и объема, несущие информацию разной природы. Тогда вполне оправданно хранить метаданные в табличных структурах данных под управлением реляционной СУБД, а содержимое ЭД – в объектных структурах под управлением объектной или объектно-реляционной СУБД. Такой подход позволит выбрать оптимальную (с точки зрения производительности обработки запросов к ЭД) архитектуру системы.

Поскольку современные СУБД оптимизируют затраты на поиск данных и обработку запросов в многопользовательском режиме работы, частота обращений к метаданным в СУБД будет зависеть только от конфигурации самой системы.

Были рассмотрены несколько вариантов выбора архитектуры ИХ и взаимодействующих с ними ИС:

1. Метаданные и содержимое документа расположены в разных ИХ. Прикладные ИС поддерживают свою базу данных документов и обмениваются друг с другом только через общую БД электронных документов (модель процесса процессно-ориентированной интеграции [4]).
2. Метаданные и содержимое документа расположены в разных хранилищах. Прикладные ИС поддерживают одну и ту же базу данных, обмениваясь между собой ссылками на общие документы (модель процесса сервисно-ориентированной интеграции [4]).
3. Метаданные и содержимое документа расположены в одном хранилище. Прикладные ИС поддерживают ту же базу данных, используют прямые запросы к данным (модель процесса информационно-ориентированной интеграции [4]).
4. Вычислительная процедура решения задачи (6) – (9) строилась на основе метода динамического программирования [5].

В табл. 1 приведены начальные параметры, использованные для тестового расчета. При вычислении принималось, что суммарный объем всех ЭД полностью входит в одно из хранилищ. Для расчета по второму варианту фиксировалось количество копий ЭД (включая метаданные и содержимое) так, чтобы ЭД только частично располагался в хранилище (либо метаданные, либо содержимое). Значения остальных параметров выбирались таким образом, чтобы исключить доминирующее влияние одного из ИХ или ИС на результаты.

В табл. 2 представлены результаты работы вычислительной процедуры при заданных параметрах. Значения целевой функции задачи для удобства сопоставления пронормированы путем деления на максимальное из этих значений во всех рассмотренных случаях.

Из табл. 2 видно, что значения целевой функции ведут себя одинаково для первых двух вариантов архитектурных решений (Случай 1 и Случай 2). Для третьего варианта (Случай 3) минимальное значение стоимости документопотоков резко возрастает после превышения порогового значения количества ЭД (500 в данном варианте расчета).

Таким образом, в результате решения задачи (6) – (9) получается наилучшее с точки зрения комплексного критерия (5) распределение ЭД по информационным хранилищам системы. Это позволяет непосредственно перед записью метаданных или содержимого ЭД «просчитать» наиболее оптимальный вариант их размещения.

Табл. 1. Параметры для тестового расчета.

Название параметров	Значения параметров		
	Случай 1	Случай 2	Случай 3
Количество хранилищ (N)	2	2	1
Количество ИС (L)	1	–	–
Пропускная способность каналов связи до хранилищ (R_i), Кб/сек	60000 60000	60000 60000	60000
Пропускная способность каналов связи до ИС (R'_i), Кб/сек	200	–	–
Максимально допустимое время ожидания (T_i), сек	1800	1800	1800
Максимальный объем хранилища (O_i), Мб	500000 500000 100000	500000 500000	500000
Стоимость хранения данных (s_i^1)	4000 4000	4000 4000	4000
Стоимость получения данных из хранилища (s_i^2)	4000 4000	400 400	400
Стоимость получения данных из ИС (s_i^3)	4000	–	–

Табл. 2. Нормированные значения целевой функции.

Количество документов	Значение целевой функции		
	Случай 1	Случай 2	Случай 3
10	0,0021	0,0021	0,0359
60	0,0133	0,0133	0,0675
100	0,0215	0,0215	0,0694
200	0,0452	0,0452	0,0732
300	0,0667	0,0667	0,0773
400	0,0882	0,0882	0,0812
500	0,1097	0,1097	0,0850
600	0,1312	0,1312	1,0000

Построенную математическую модель можно использовать для управления электронным документооборотом в ходе мониторинга окружающей среды так, чтобы была возможность сопоставить между собой различные варианты архитектурных решений информационной среды и выбрать наилучший в плане минимизации стоимости документопотоков при заданных технических характеристиках.

Литература

1. Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 18.07.2011) «Об охране окружающей среды» (принят ГД ФС РФ 20.12.2001).
2. Бессонов С.В. Оптимизация электронного документооборота в корпоративных системах // Дис. ... канд. экон. наук. М., 2001. 187 с.
3. Гудов А.М., Завозкин С.Ю. Об одной модели оптимизации документопотоков, реализуемой при создании системы электронного документооборота // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, спецвыпуск. С. 53-65.
4. Гудов А.М., Завозкин С.Ю. Интеграция распределенных приложений при помощи системы электронного документооборота // Тр. Междунар. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». Павлодар: ТОО НПФ «ЭКО», 2006. Т. II. С. 442-451.
5. Мину М. Математическое программирование. Теория и алгоритмы. М.: Наука, Глав. ред. физ.-мат. лит., 1990. 488 с.

Технологии компьютерного картографирования, ГИС-анализа и моделирования природно-антропогенных экосистем на примере Новосибирского Академгородка

Н.Н. Добрецов¹, И.Д. Зольников¹, Н.В. Глушкова¹, В.А. Лямина¹, К.С. Соколов¹, Н.И. Макунина¹, В.В. Смирнов², Д.В. Пчельников¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

² Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Введение

Характерной чертой Новосибирского Академгородка является диффузная застройка, «основой которой является взаимопроникновение жилых и рабочих кварталов и больших массивов нетронутых природных насаждений» [6], что позволяет называть его экополисом в современном его понимании по [2]. Таким образом, город-лес или экополис по [2] представляет собой гетерогенную природно-антропогенную систему, для которой присуще мозаичное пространственное распределение разных типов ландшафта. Поэтому для исследования экосистем Академгородка используется комплексная технология геоинформационного моделирования сложных природно-антропогенных систем, которая разработана на основе технологии выделения гетерогенных природно-территориальных комплексов (ПТК) [4]. Это позволяет не только картографировать, но и оценивать вклад различных типов природных и антропогенных объектов (в зависимости от их процентного соотношения) в ПТК. Кроме того, с использованием разработанной технологии возможно проводить моделирование изменений пространственной структуры природно-антропогенных экосистем.

Создание базы геоданных

На первом этапе формирования базы геоданных создавалась географическая основа (подложка) ГИС для изучаемой территории. В качестве такой основы выбраны снимки высокого разрешения Quickbird и детальные топографические материалы масштаба 1 : 10 000. Для разрешения противоречия между требованиями секретности и требованиями детальности исследований была произведена перекодировка геоданных на снимок среднего разрешения Landsat (рис 2.1), что позволило получить искажение абсолютной геопривязки тематических слоев с сохранением относительных пропорций и расстояний внутри выбранного участка исследований. Космоснимки высокого разрешения разделены на равные фрагменты (фрэймы - frame), каждый из которых покрывает территорию 2 x 2 км. Общее покрытие состоит из 100 фрэймов (10x10 фрагментов). По космоснимкам Quickbird проведена векторизация ряда объектов. В их числе: 1) Транспортные коммуникации: асфальтовые и грунтовые дороги, пешеходные и велосипедные дорожки, асфальтированные площадки и т.п. (полигональный слой); 2) Строения: жилые, хозяйственные, административные и другие здания (полигональный слой); 3) Гидрография: Новосибирское водохранилище, озера, старицы, пруды, протоки, реки и ручьи (полигональный слой); 4) Улицы и основные транспортные магистрали (линейный слой); 5) Растительность (полигональный слой); 6) Зонирование территории по функциональному значению (полигональный слой); 7) Изолинии высот (линейный слой). В результате получен набор тематических слоев (как векторных, так и растровых), составляющих географическую основу ГИС.

После выполнения работ по векторизации следовал этап по наполнению объектов базы геоданных атрибутивной информацией. Классификация объектов и дополнительная атрибутивная информация необходима для пространственного анализа (построения плотностных сеток и определения антропогенной нагрузки на территорию). Исходные данные - изолинии высот были оцифрованы по схеме масштаба 1:10000. Эти данные были проверены топологически. По космическим снимкам был оцифрован слой полигональной гидрографии (Новосибирское водохранилище, озера, старицы, пруды, протоки) и заполнена атрибутивная информация абсолютной высоты. Была построена цифровая модель рельефа (ЦМР) Академгородка и прилегающей территории. ЦМР позволяет не только четко позиционировать наблюдения по абсолютным отметкам, автоматически строить геоморфологические профили, но и создавать различные модели местности, ориентированные на решение экологических задач. Созданная географическая основа для ЭКОГИС АКАДЕМГОРОДКА далее передавалась тематическим специалистам: геологам, почвоведом, ботаникам, зоологам в виде тематических векторных и растровых слоев для программных пакетов ARCVIEW и ARCGIS. Для хранения географических данных и работы с ними используется файловая база геоданных ArcGIS 9.3. Этот формат имеет ряд преимуществ по сравнению с персональной базой геоданных и шейп-файлами. Общий размер файла с данными и файла-проекта – около 10 МБ.

В случае если тематические специалисты работают с ArcGIS более ранних версий или с другими ГИС – возможен экспорт из базы геоданных практически в любой ГИС-формат. Актуальные данные располагаются на сервере в виде WMS (Web Map Services) и доступны как для просмотра в браузере, так и для добавления слоев в карту любой ГИС, которая может работать с WMS-слоями. Для демонстрационных целей возможно создание электронной карты в виде исполняемого файла (*.exe),

состоящего из программной оболочки (просмотрщика) и собственно электронной карты. С такой электронной картой можно работать на компьютерах под управлением Windows или на мобильных устройствах под управлением Windows Mobile и Apple iOS. При этом данные защищены от несанкционированного распространения. Доступ пользователей к пространственной информации также может регулироваться установкой пароля и ограничением времени использования карты. Получившийся файл можно пересылать по электронной почте, добавлять в презентации, выкладывать на сайт для скачивания, распространять на CD и других электронных носителях. Для использования такой электронной карты не требуется какого-либо дополнительного программного обеспечения или специальных навыков ГИС-специалиста. Электронная карта Академгородка (с растром) занимает примерно 200 МБ.

Кроме того, на территорию Новосибирского Академгородка разработан ГИС-атлас, доступный через интернет по протоколу WMS. Для полноценного описания территории недостаточно просто создания картографических материалов. Ко всем созданным данным необходимо заполнить соответствующие метаданные - описывающие данные, так например: авторство, права доступа, дата создания, доступные носители и пр. [5]. Кроме того необходимо создание некартографических материалов, также описывающих эту территорию. В рамках работы по проекту проводится апробация созданного профиля метаданных, позволяющего описать сущность ГИС-атласа. Этот профиль в дальнейшем может быть использован для создания ГИС-атласа любой другой территории. ГИС-атлас предполагает три уровня иерархии: слой, карта и непосредственно атлас. Между картографическими сущностями возможны множественные связи: так карта может содержать несколько слоев, а один слой может входить в состав нескольких карт; атлас содержит несколько карт, а одна карта может входить в состав нескольких атласов. Кроме того ГИС-атлас может содержать и некартографические материалы — различные статьи, приложения и др., для которых, также как и для картографических материалов должны быть описаны метаданные. Благодаря тому, что используемый профиль метаданных основан на стандарте ISO:19115, данные подготовленного ГИС-атласа могут быть использованы и в других проектах, как построенных по той же технологии, так и любой другой системе, которая имеет механизм работы с метаданными поддерживающей стандарт ISO:19115 (например, российский портал «ГеоМета»).

В настоящее время по Академгородку подготовлены и доступны по протоколу WMS: почвенные карты, карты состояния лесов, ряд зоологических и экологических карт, а также целый ряд слоев описывающих территориальное деление и инфраструктуру Академгородка. Для всех этих ресурсов заполняются метаданные, для того чтобы регламентировать получение доступа к этим данным, а также осуществлять полноценный поиск по ресурсам. Помимо непосредственно метаданных для проекта Академгородок, не менее важным является инструмент создания web-картографических наборов, разработанный в ИГМ СО РАН. Еще одной немаловажной функцией работы со слоями разных серверов-источников является, что склейка графических изображений и атрибутивных данных одновременно запрошенных слоев осуществляется непосредственно системой управления WMS ресурсами. Следующим этапом в разработки программного обеспечения по проекту Академгородок будет реализация открытых протоколов обмена метаданных для интеграции с различными каталогами РАН (например, с ГИС-порталом разработанным ИВМ СО РАН)

Картографирование природных объектов

При картографировании лесного покрова Академгородка, использовался анализ и сопоставление двух космических снимков высокого разрешения QuickBird: позднеосеннего и летнего. Рассмотрим разработанную технологию картографирования на примере изучения лесной растительности Центрального сибирского ботанического сада СО РАН [3]. Осенний снимок использовался для выделения хвойных деревьев, поскольку виды лиственных деревьев уже сбросили листву, а хвойные так и остались зелеными. Была разработана технология автоматической классификации снимка высокого разрешения для оценки плотности леса и количественного соотношения хвойных и лиственных пород деревьев. Технология состоит в проведении классификации космического снимка, конвертации результатов классификации в векторный формат и последующем построении плотностных сеток (рис. 1). При проведении классификации с обучением правилом максимального правдоподобия на осеннем снимке были выделены площади распространения хвойного леса. Полученный класс конвертировался в векторный слой, показывающий распределение и сомкнутость хвойных деревьев в изучаемых лесах. На летнем снимке лиственные и хвойные виды деревьев располагаются близко в пространстве спектральных признаков и тяжело поддаются распознаванию методами автоматической классификации. Однако этот снимок отражает реальную картину распространения и сомкнутости лиственных деревьев в лесах Академгородка, в то время как характеристики их сомкнутости на позднеосенних снимках получаются сильно заниженными. Вектор, полученный на основе классификации летнего снимка методом максимального правдоподобия, представлен кронами как лиственных, так и хвойных деревьев. Для того чтобы выделить из вектора крон всего леса лиственные и хвойные деревья проводилась оверлейная операция. Для этого векторный слой хвойных пород деревьев, полученный на основе осеннего снимка, наложили на векторный слой всего леса летнего снимка. Объединив пашни, залежи, газоны, дороги и тени в один класс и распределив леса между разными видами деревьев, мы получили три типа объектов:

кроны хвойных деревьев, кроны лиственных деревьев и открытые пространства. Для того, чтобы разделить вектор проекции кроны всего леса на лиственные и хвойные деревья проводилась оверлейная операция. Для этого вектор проекции кроны хвойных деревьев, полученный на основе осеннего снимка, наложили на вектор всего леса и получили местоположение хвойного леса. Затем были построены серии плотностных схем (с шагом сетки 2,5 м и радиусом окна 50 м), отражающие проекции кроны летнего леса, леса по соотношению хвойных и лиственных пород.

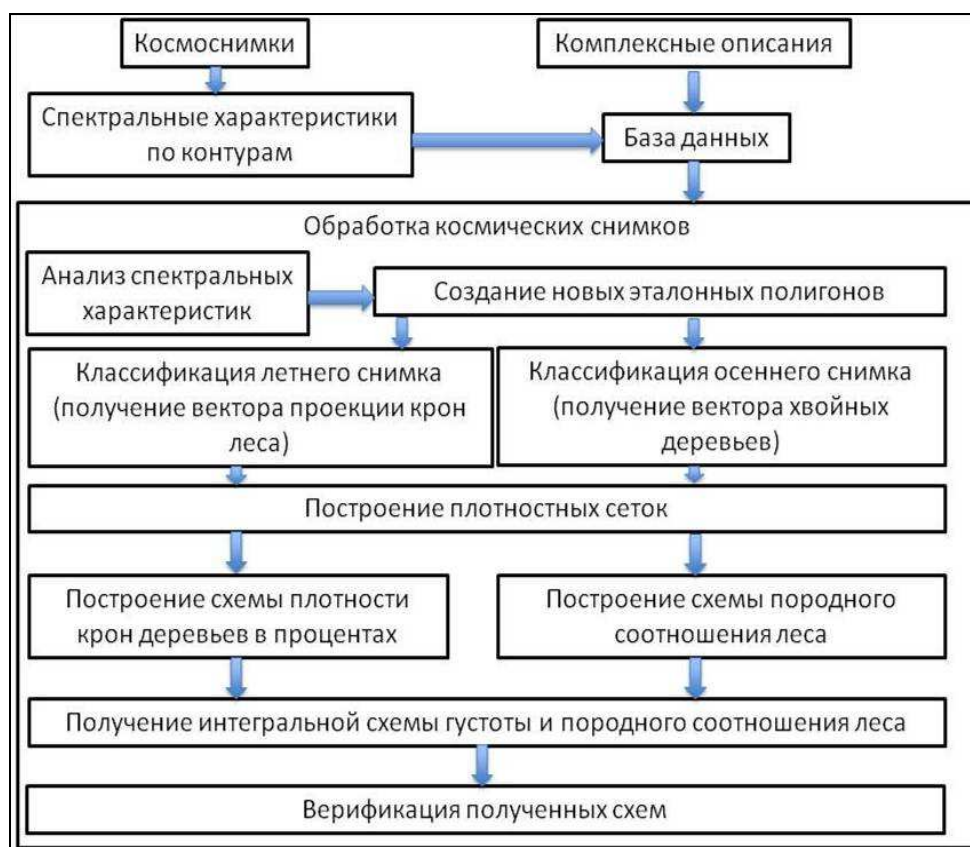


Рис. 1. Технологическая схема построения схем густоты и породного соотношения леса.

Табл. 1. Площади распространения различных типов лесных сообществ леса ботанического сада в зависимости от густоты (в процентах от общей площади).

Типы лесных сообществ	Отдельно стоящие деревья (0-20%)	Разреженный лес (20-40%)	Нормальный лес (40-70%)	Густой лес (70-100%)
Хвойный	0,013	0,15	0,42	0
Хвойно-лиственный	0,41	2,5	9,4	0,001
Лиственный-хвойный	0,09	0,6	1,8	0
Лиственный	6,15	9,03	68,7	0,86

Анализ векторных слоев показал, что большая часть лесов ботанического сада характеризуется средней сомкнутостью, что подтверждается полевыми исследованиями. При анализе породного состава лесов выяснилось, что разные сочетания пород занимают различные площади (табл. 1). Так, например, сомкнутые хвойные и лиственно-хвойные леса на изученной территории отсутствуют. Здесь же отметим, что сомкнутые хвойно-лиственные и лиственные леса в сумме не превосходят 0,9% площади территории. На территории ботанического сада преобладают лиственные леса средней сомкнутости (68,7%), на долю хвойно-лиственных лесов средней сомкнутости приходится 9,4% территории, разреженных лиственных - 9%.

Аналогичный подход был использован для картографирования других лесных участков территории Академгородка и его ближайшего окружения.

Моделирование природно-антропогенных территориальных комплексов

Для анализа мозаичных природно-антропогенных экосистем Академгородка и его ближайшего окружения использована комплексная технология геоинформационного моделирования сложных природно-антропогенных систем, которая разработана на основе технологии выделения гетерогенных

природно-территориальных комплексов (ПТК) [4]. При создании базы геоданных были выделены основные природные (леса) и антропогенные (застройка, автомобильные и железные дороги, тропинки и т. п.) составляющие ПТК Академгородка. Антропогенные объекты расклассифицированы по степени воздействия на окружающую среду (База нормативной документации). Природные объекты получены в результате классификации космических снимков высокого разрешения. На следующем этапе строятся плотностные схемы для каждого типа элементарного ПТК. Шаг сетки в каждом конкретном случае определяется пространственным разрешением обрабатываемого космического снимка, а радиус скользящего окна подбирается эмпирически в соответствии с функциональным масштабом карты. Были приняты следующие категории дорог/зданий и их воздействие на окружающую среду (табл. 2, 3).

Табл. 2. Коэффициенты воздействия дорог на окружающую среду.

Объект \ Коэффициент воздействия	1	2	3	4
Дороги федерального значения				250 м (I класс)
Дороги с интенсивностью более 2000 ед/сутки, железная дорога			120 м (II класс)	
Дороги с интенсивностью менее 2000 ед/сутки		50 м (III класс)		
Тропинки, велосипедные дорожки	10 м (IV класс)			
Здания с этажностью от 1 до 3	10 м			
Здания с этажностью от 4 до 8		50 м		
Здания с этажностью от 9 до 16			120 м	

Табл. 3. Количество домов Академгородка с различной этажностью.

Этажность	Количество домов	Категория воздействия
1-3	7913	1
4-8	289	2
9-16	114	3

Для отображения схем рабочего масштаба 1:25000 целесообразно строить плотностные сетки с радиусом 100 м. Для создания более генерализованных схем можно использовать радиус 250 метров. Шаг сетки везде равен пространственному разрешению снимка QuickBird и составляет 2,4 м. Полученный полигональный векторный слой был конвертирован в точечный, по которому были построены 2 плотностные схемы с коэффициентами категории влияния (от 1 до 4) и с коэффициентами зоны воздействия (от 10 до 250).

После сравнения плотностных сеток было решено использовать сетку техногенной нагрузки с коэффициентом зоны воздействия (от 10 до 250 м). Затем она была нормирована на значение, равное 100% заполнению скользящего окна объектами с коэффициентом воздействия 100 м. В физическом смысле такое плотностное значение соответствует территории, которая полностью занята дорогами и зданиями третьей категории. Также была построена сетка по вектору растительности с радиусом 100 м и нормирована на максимальное значение, т.е. на значение, соответствующее 100% заполнению скользящего окна лесной растительностью. Полученные сетки были классифицированы методом Natural Brakes (Jenks), в результате чего в их пределах были выделены статистические обусловленные зоны, контрастные по типовым значениям. Метод Natural Brakes был выбран потому, что в нем границы классов определяются в тех местах гистограммы, где имеется резкий перепад между группами значений. При этом образуются интервалы, которые лучше всего группируют близкие значения и максимизируются различия между классами. Древесная растительность и техногенная нагрузка были разделены на 4 группы. По степени техногенного воздействия выделены группы с отсутствием техногенной нагрузки, со слабой нагрузкой, со средней нагрузкой и с сильной техногенной нагрузкой. Древесная растительность была разделена на отдельно стоящие деревья, разреженный лес, нормальный лес и густой лес. На следующем шаге полученные сетки конвертировались в вектор и проводились оверлейные операции по совмещению техногенной застройки и древесной растительности. Поскольку

класс с редкой растительностью и средней техногенной нагрузкой небольшой по площади то он был объединен с классом с редкой растительностью и слабой техногенной нагрузкой. Так же классы с густым лесом и сильной и средней техногенной нагрузкой были объединены соответственно с классами с нормальным лесом и средней и сильной техногенной нагрузкой. На рис. 2 представлена интегральная схема растительности и застройки, а в таблице 4 приведены процентное содержание различных комбинаций.

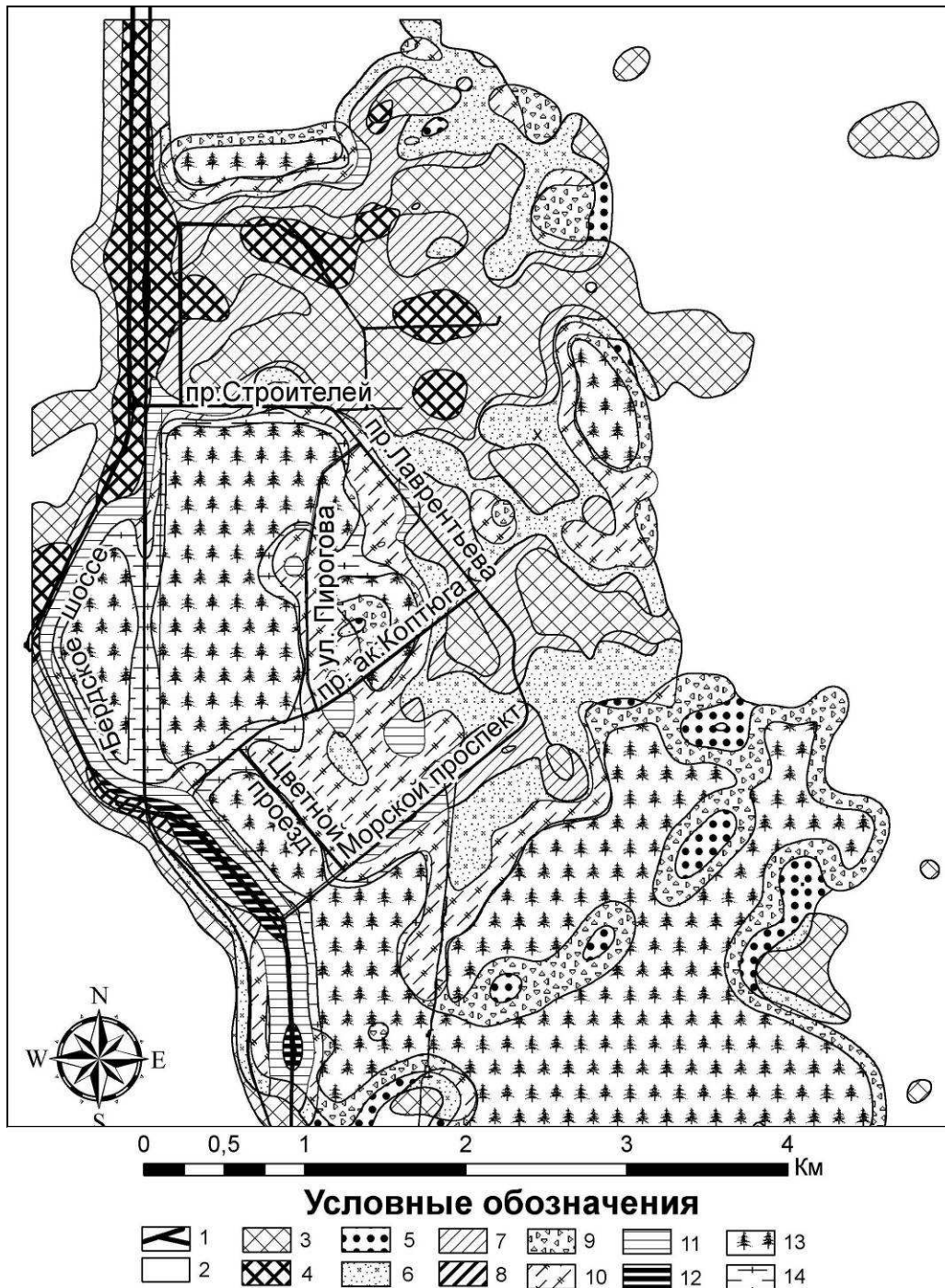


Рис. 2. Интегральная схема древесной растительности и техногенной застройки. Условные обозначения: 1 – дороги; 2 – пустыри; 3 – участки со средним техногенным воздействием и отдельными деревьями; 4 – Участки с сильным техногенным воздействием и отдельными деревьями; 5 – разреженный лес без техногенного воздействия; 6 – разреженный лес со слабым техногенным воздействием; 7 – разреженный лес со средним техногенным воздействием; 8 – разреженный лес с сильным техногенным воздействием; 9 – нормальный лес без техногенного воздействия; 10 – нормальный лес со слабым техногенным воздействием; 11 – нормальный лес со средним техногенным воздействием; 12 – нормальный лес с сильным техногенным воздействием; 13 – густой лес без техногенного воздействия; 14 – густой лес со слабым техногенным воздействием.

Табл. 4. Природно-территориальные комплексы, выделенные в зависимости от соотношения площади распространения различных типов техногенной застройки и древесной растительности (в процентах) для сетки радиусом 250 м.

	Отдельно стоящие деревья	Редкий лес	Нормальный лес	Густой лес
Нет техногенного воздействия	0,15	2,15	7,8	29,7
Слабое техногенное воздействие	17,3	9,85	10,1	3,85
Среднее техногенное воздействие	0	8,5	4	0
Сильное техногенное воздействие	5,6	0,3	0,7	0

Созданная база данных и ГИС-атлас Новосибирского Академгородка является основой для дальнейшего мониторинга и моделирования природно-антропогенных экосистем территории. Это позволяет получить доступ через интернет к различным тематическим данным специалистам различного профиля. Предлагаемая комплексная технология моделирования гетерогенных ландшафтов позволяет не только картографировать их, но и количественно оценивать степень влияния антропогенных систем на природную среду. Кроме того, созданная база позволяет проводить ретроспективное и прогнозное моделирование природно-антропогенной системы, а также является основой для дальнейшего мониторинга и планирования развития территории.

Литература

1. База нормативной документации: www.complexdoc.ru. Руководство по оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) при проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации объектов дорожного хозяйства.
2. Владимирова В.В. Урбоэкология Курс лекций. М: МНЭПУ, 1999. 204 с.
3. Глушкова Н.В., Зольников И.Д., Лямина В.А. и др. Картографирование лесных массивов Центрального сибирского ботанического сада // Вестник НГУ. 2010. Т. 8, № 3. С. 83-91.
4. Зольников И.Д., Лямина В.А., Королюк А.Ю. Комплексная технология картографирования и мониторинга гетерогенных ландшафтов // География и природные ресурсы. 2010. № 2. С. 126-131.
5. Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных Российской Федерации // Геодезия и картография. 2006. № 10. С. 1-6.
6. Природа Академгородка: 50 лет спустя / отв. ред. И.Ф. Жимулев // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 250 с.

Геоинформационные веб-сервисы и приложения для интернет-системы мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края

А.А. Кадочников

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск

Введение

Актуальным направлением в области охраны природы при добыче и переработке нефти и газа являются мониторинг загрязнения нефтью и нефтепродуктами окружающей среды. Возникает проблема утилизации образующихся отходов предприятий нефтегазовой отрасли. Повышается риск возникновения лесных пожаров. Мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли позволяет сократить расходы на ликвидацию последствий техногенных аварий, что в свою очередь снижает вероятность загрязнения почвы, поверхностных вод, гибели растительности и представителей животного мира.

В настоящей работе рассматривается задача формирования геоинформационной Интернет-системы мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли для системы поддержки принятия решений на уровне Красноярского края. В работе востребованы методики и программные средства, которые позволят формировать оценки состояния территорий на базе основных показателей в наглядном виде. Важную роль играет использование современных средств визуализации данных с использованием ГИС-технологий. В таких задачах использование Интернет-технологий имеет ряд преимуществ по сравнению с настольными ГИС – доступность предлагаемых решений большому числу пользователей, упрощение процесса установки и распространения программного обеспечения, снижение его стоимости, возможность интеграции со сторонними приложениями и проч. Основное внимание уделяется описанию проблем и решений связанных с разработкой веб-сервисов и приложений. Решение таких задачи с технологической точки зрения обеспечивается построением комплекса взаимосвязанных программных элементов, среди которых присутствуют как настроенные должным образом «коробочные» программные продукты, так и оригинальные авторские разработки. С организационной точки зрения – решение задачи опирается на технологические регламенты информационного взаимодействия и нормативные документы.

Функционально назначение системы – создание распределенной системы идентификации, адресации и позиционирования объектов управления на территории края с использованием средств цифровой картографии и геоинформатики в виде каталога пространственных данных, состоящего из тематических электронных карт и космических снимков высокого разрешения. Он призван обеспечить оперативное решение следующих задач:

ведение, хранение цифровых картографических материалов, растровых снимков территории;
навигация по информационным картографическим ресурсам, визуализация и анализ пространственно-ориентированных данных на унифицированных цифровых картах;
предоставление картографических веб-сервисов и ресурсов для сторонних прикладных информационных систем.

Пользовательский интерфейс системы решено выполнить в виде геоинформационного веб-приложения. Несмотря на некоторые недостатки, этот подход имеет существенные преимущества, как для пользователя, так и для разработчика, в том числе: независимость от платформы, отсутствие необходимости устанавливать дополнительное программное обеспечение, отсутствие с проблем с поддержкой старых версий программ и обратной совместимостью, и др [1,2].

Решение строилось на основе свободно распространяемых технологий и программного обеспечения:

- платформа для публикации картографических данных – MapServer 5.x (<http://www.mapserver.org>);
- платформа для публикации картографических данных – MapGuide Open Source 2.x (<http://mapguide.osgeo.org>);
- система кэширования картографических данных – GeoWebCache 1.2.x (<http://www.geowebcache.org>);
- основной язык разработки – PHP 5.2 (<http://www.php.net>);
- СУБД – PostgreSQL 8.3 (<http://www.postgresql.org>) + PostGIS 1.5 (<http://www.postgis.org>).

Программное обеспечение и технологии для веб-приложения на стороне клиента

Для построения клиентской части веб-приложения подходят несколько технологий – DHTML, Flash, SVG (Scalable Vector Graphics – масштабируемая векторная графика). Их возможностей достаточно для реализации клиентской логики картографического веб-интерфейса. Одним из интересных решений и популярных на сегодняшний день является применение технологии динамического HTML с методами

асинхронного обмена данными без перезагрузки страницы (Remote Scripting, AJAX). Практически все современные веб-браузеры поддерживают эти технологии без использования дополнительных модулей.

Суть асинхронного обмена данными заключается в том, что некоторые данные динамически загружаются с сервера и встраиваются в основную HTML страницу без ее перезагрузки. Это позволяет уменьшить объем передаваемой информации по сети и улучшить «качество» пользовательского интерфейса. В результате, можно говорить, что пользовательская часть системы является клиентским приложением, а не набором динамических страниц, генерируемых сервером. Использование такого подхода дает возможность частично разделить логику клиентской и серверной частей, что приводит к более высокой гибкости всей системы.

Общий интерфейс пользователя построен с использованием библиотеки Sencha (ранее ExtJS). Sencha – это библиотека JavaScript для разработки веб-приложений и пользовательских интерфейсов. Использует адаптеры для доступа к библиотекам Yahoo! UI Library, jQuery или Prototype/script.aculo.us. Поддерживает технологию AJAX, анимацию, работу с DOM (Document Object Model), реализацию таблиц, вкладок, обработку событий и все остальные новшества «Веб 2.0». Использование этой библиотеки при разработке системы позволило значительно сократить время на подготовку интерфейса пользователя.

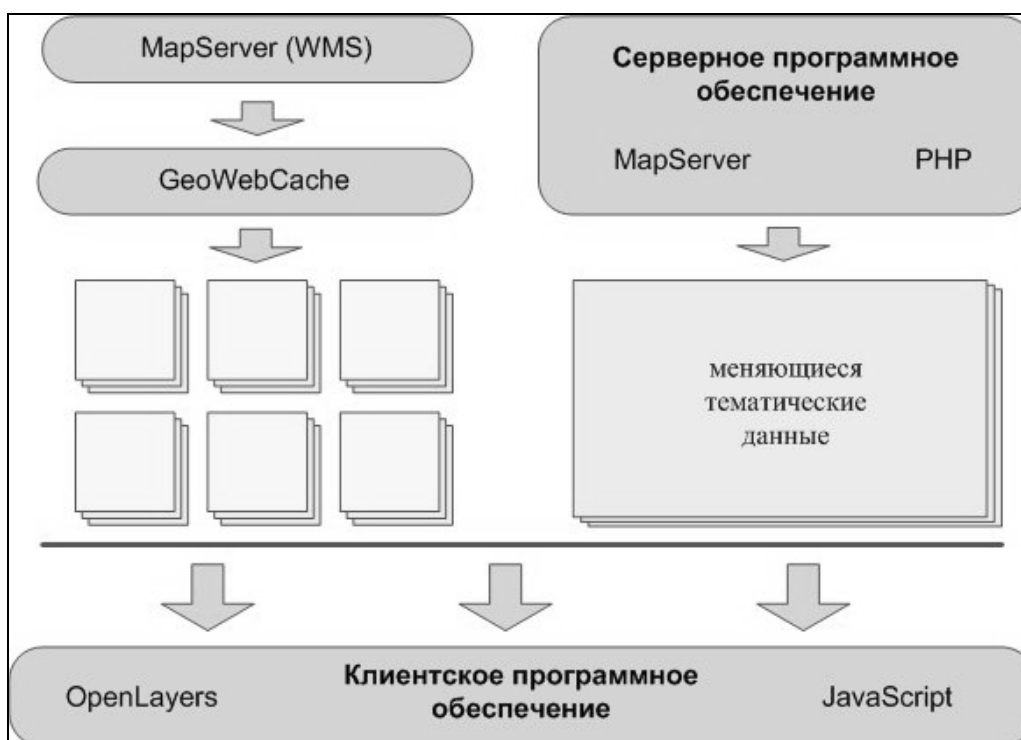


Рис. 1. Формирование карты для веб-приложения.

При разработке картографического компонента веб-интерфейса были проанализированы два способа представления картографической информации для пользователя. Первый способ – карта отображается с использованием фрагментов (тайлы). Эту технологию используют такие ресурсы как Google Maps (<http://maps.google.com>), Яндекс Карты (<http://maps.yandex.ru>), Virtual Earth (<http://www.bing.com/maps>) и др. Основным преимуществом такого способа является скорость получения визуальной информации пользователем и малая нагрузка на сервер при отображении статической информации. Процесс формирования карты на клиентском компьютере состоит из нескольких этапов, с использованием дополнительных программных потоков, механизма кэширования, очереди загрузки фрагментов и др. При таком способе отображения карты пользователю процесс построения композиции карты позволяет оптимизировать процесс загрузки, снизить нагрузку на веб-браузер и более равномерно ее распределить по времени. Однако при отображении меняющихся тематических данных такой способ снижает скорость доступа пользователя к пространственным данным и увеличивает нагрузку на сервер. Для решения этой проблемы используется второй способ отображения информации – по запросу пользователя генерируется одно растровое изображение [3,4]. В зависимости от типа представляемой информации пользователю в программном интерфейсе системы используется комбинация этих двух способов (рис. 1).

Сегодня существует большое число библиотек с открытым исходным кодом для создания готового пользовательского интерфейса с картографическим интерфейсом, например OpenLayers (<http://www.openlayers.org>), GeoExt (<http://geoext.org>), MapFish (<http://www.mapfish.org>), Fusion (<http://trac.osgeo.org/fusion/>) и др. Однако функционала существующих библиотек было недостаточно для решения поставленной задачи и было разработано веб-приложение с использованием библиотеки

OpenLayers. OpenLayers – это JavaScript библиотека с открытым исходным кодом, предназначенная для создания карт на основе программного интерфейса, подобного API Яндекс.Карт (<http://api.yandex.ru/maps/>), GoogleMap API (<http://code.google.com/intl/ru/apis/maps/>) или Virtual Earth API (<http://www.microsoft.com/maps/isdk/ajax/>), поддерживает технологию AJAX и анимацию [5].

Программное обеспечение и технологии для веб-приложения на стороне сервера

Для разработки геоинформационного каталога используется комплекс программных средств MapGuide Open Source, предназначенных для обеспечения доступа через Интернет к интерактивным картам и программное обеспечение MapServer, которое представляет собой открытую и свободно распространяемую среду разработки Интернет-приложений для работы с электронными картами широко распространенных векторных и растровых форматов. MapServer позволяет интегрировать данные из нескольких источников или серверов, а также использовать средства программирования для создания пользовательских приложений, обеспечивает прямой доступ к файлам различных форматов систем автоматизированного проектирования и разработки геоинформационных систем. На основе механизма динамических библиотек разделяемого доступа MapServer обладает программным интерфейсом к нескольким наиболее популярным скриптовым языкам программирования, что позволяет использовать функции и процедуры MapScript при разработке различного рода приложений и обеспечивает значительную гибкость при решении каждой конкретной задачи. В дальнейшем рассматривается возможность использования программного обеспечения GeoServer, который во многом похож на MapServer. Однако, в отличие от MapServer, GeoServer реализует спецификацию WFS-T (Web Feature Service -Transaction). Это означает, что используя GeoServer, вы можете не только получать данные для построения на их основе собственных карт, но также редактировать полученные данные с последующим автоматическим обновлением исходной информации на сервере (рис. 2).



Рис. 2. Структурная схема Интернет-каталога пространственных данных.

Источником пространственных данных для сервера с программным обеспечением GeoWebCache послужил WMS сервер с картой Красноярского края на основе программного обеспечения MapServer. Объем этой карты составляет приблизительно 6 Гбайт файлов в векторном формате и постоянно увеличивается. Дополнительно реализована система сервисов, которые поддерживают кэш растровых изображений на сервере с GeoWebCache в актуальном состоянии при обновлении исходных данных на WMS сервере [6].

Исходными данными для карты Красноярского края являются файлы векторных данных в формате shape-файлов (общепринятый формат для обмена картографической информацией). Однако с помощью библиотек GDAL (Geospatial Data Abstraction Library, <http://www.gdal.org>) и OGR Simple Features Library (<http://www.gdal.org/ogr/>) появляется возможность для загрузки огромного числа различных растровых и

векторных форматов (OGR – PostGIS, ESRI ArcSDE, Oracle Spatial, MySQL, MapInfo и др., GDAL – TIFF/GeoTIFF, EPPL7, MrSID и др.). Проведенные исследования показали, что на основе пространственных данных в формате shape-файлов, MapServer быстрее всего формирует растровое изображение по запросу пользователя.

В результате объединения различных технологий представления карты пользователю на стороне клиента реализован вариант, в котором карта состоит из двух слоев: подложка и тематический слой.

В качестве слоя подложки используется карта Красноярского края, построенная на основе маленьких растровых изображений (тайлов) размером 256x256 пикселей. Набор тайлов организован в виде пирамиды для 16 масштабных уровней, начиная от карты России и заканчивая картами населенных пунктов масштаба 60 см на пиксель. Эта карта может размещаться на любом сервере, путь к которому определяется в клиентском программном обеспечении. Важным требованием к такому серверу является наличие большого дискового пространства (порядка 10 терабайт при полностью сформированном наборе тайлов). Однако территория Красноярского края слабо населена и не возникает необходимости в создании набора тайлов на весь край для самых подробных масштабных уровней, что значительно сокращает его объем. Кэш тайлов заранее был сформирован для первых 10 уровней, для остальных уровней кэш тайлов генерируется по мере обращения пользователя к определенным участкам карты Красноярского края.

Вторая часть карты накладывается поверх слоя подложки в виде полупрозрачного растрового изображения. Эта часть карты отображает всю сеть объектов разрабатываемого информационного ресурса для территории Красноярского края, либо ее срез в зависимости от настроек пользователя. Пользователь с помощью системы администрирования может определить источник отображаемых данных.

Второй составляющей геоинформационной Интернет-системы является хранилище метаданных, реализованное на основе СУБД PostgreSQL. PostgreSQL – это свободно распространяемая объектно-реляционная система управления базами данных, наиболее развитая из открытых СУБД в мире и являющаяся реальной альтернативой коммерческим базам данных. Существуют версии этой СУБД для различных Unix-систем и для Windows. Дополнительно установлено программное обеспечение PostGIS, которое является расширением для объектно-ориентированного сервера реляционных баз данных PostgreSQL. PostGIS привносит в объектно-реляционную базу данных PostgreSQL поддержку географических объектов. В результате PostGIS превращает PostgreSQL в пространственную серверную базу данных для геоинформационных систем, подобно расширениям SDE компании ESRI или расширению Spatial компании Oracle. В дальнейшем планируется использование СУБД Oracle с расширением Spatial для хранения больших объемов векторных данных.

Пользовательский интерфейс

Пользовательский веб-интерфейс информационной системы построен с использованием современных подходов и технологий, обеспечивающих удобное и эффективное взаимодействие с приложением. Основными элементами интерфейса системы является (рис. 3):

- дерево ресурсов выбранного раздела;
- тематическая легенда;
- информационное окно;
- информационная панель с картой.

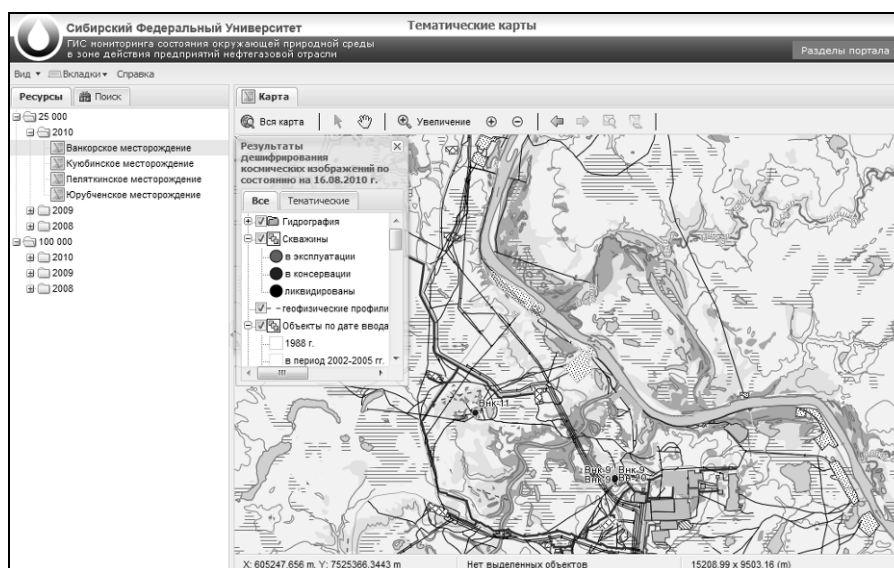


Рис. 3. Интерфейс пользователя.

Дерево ресурсов выбранного раздела - список доступных ресурсов выбранного пользователем раздела тематических или топографических данных Красноярского края, представленный в виде дерева с применением различных классификаций (по времени, по территории и т.п.).

Тематическая легенда – позволяет пользователю настраивать параметры отображения карты с возможностью управления слоями. Дополнительно предоставляется сведения о тематических данных просматриваемой карты (раскраска, описание).

Информационное окно – информация о выбранных пользователем объектах слоя в табличном виде, содержащая название слоя и атрибутивные данные об объекте.

Информационная панель с картой – основной элемент интерфейса пользователя, отображающий выбранную тематическую или топографическую карту. Для управления картой предусмотрен ряд стандартных инструментов:

- показать всю карту на экран;
- включить режим мыши «Перемещение карты»;
- включить режим мыши «Информация по объектам»;
- включить режим мыши «Масштабирование карты»;
- «Увеличить масштаб» – приблизить карту;
- «Уменьшить масштаб» – отдалить карту;
- «Отменить действие»;
- «Повторить действие».
- Дополнительно интерфейс пользователя включает в себя разделы:
 - База данных «Состояние окружающей среды в районах размещения объектов НГО Красноярского края по результатам наземных наблюдений»;
 - База данных наблюдений за состоянием окружающей среды;
 - Анализ состояния и загрязнения окружающей среды в зоне воздействия предприятий НГО.
- Вспомогательные материалы мониторинга:
 - Протоколы КХА;
 - Гис-проекты;
 - Исходные векторные данные;
 - Спутниковые данные;
 - Отчетные материалы.
- Общение и администрирование:
 - Форум;
 - Административный раздел.

Заключение

Первые версии каталога пространственных данных использовались при разработке Банка пространственных данных (БПД) Единой краевой информационной системы администрации Красноярского края. На основе БПД разработан Интернет-ресурс "Информационная система оценки инфраструктуры жизнеобеспечения малочисленных, труднодоступных населенных пунктов", содержащая справочные сведения и средства анализа и оценки состояния социальной и транспортной инфраструктуры, энергоресурсов, связи и возможностей использования санитарной авиации для решения проблем малочисленных, труднодоступных населенных пунктов.

Сегодня в результате развития технологий и программного обеспечения получены новые результаты, которые позволили значительно усовершенствовать существующую систему, результатом которой стала Интернет-система мониторинга состояния окружающей природной среды в зоне действия предприятий нефтегазовой отрасли Красноярского края. Ресурсы и инструменты разработанной системы могут быть использованы при разработке других систем подобного типа. Предложенная технологическая основа уже успешно использована в нескольких проектах:

«Терра: Визуальные паспорта Югры», комитет по информационным ресурсам Администрации Губернатора Ханты-Мансийского округа – Югры, 2008 г. (внутренний ресурс).

«Карта здравоохранения Красноярского края», Красноярский краевой медицинский информационно-аналитический центр (ККМИАЦ), 2008-2010 гг. (<http://www.kmiac.ru>).

«Сеть образовательных учреждений Красноярского края», Министерство образования и науки Красноярского края, 2009-2010 гг. (<http://issou.cross-edu.ru>).

Литература

1. Якубайлик О.Э., Кадочников А.А., Попов В.Г., Токарев А.В.. Модель геоинформационной аналитической Интернет-системы для анализа состояния и презентации региона // Вест. СибГАУ. 2009. Вып. 4 (25). С. 61-66.

2. Токарев А.В. Организация базы данных для информационной системы «Сеть образовательных учреждений Красноярского края» // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: технологии, научные проекты». Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. С. 98.
3. Кадочников А.А. Программное обеспечение информационно-аналитических систем на основе геоинформационного Интернет-сервера // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, спецвыпуск 2: «Информационные технологии для эколого-биологических исследований. Междисциплинарный интеграционный проект СО РАН». С. 70-78.
4. Якубайлик О.Э. Геоинформационный Интернет-портал // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, спецвыпуск 3. «ГИС- и веб-технологии в междисциплинарных исследованиях». Матер. Междисциплинарной программы СО РАН 4.5.2. Вып. I. С. 116-125.
5. Mahe L., Broadfoot C. Too Many Markers! // Google Maps API. 2011.
<http://code.google.com/intl/ru-RU/apis/maps/articles/toomanymarkers.html>
6. Кадочников А.А. Реализация информационных технологий в системе «Сеть образовательных учреждений Красноярского края» // Тез. II Междунар. конф. «Геоинформатика: технологии, научные проекты». Барнаул, 2010. С. 49.

Система параллельной обработки спутниковых данных

В.А. Кихтенко

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

С 2009 года в ИВТ СО РАН ведется прием и обработка данных дистанционного зондирования Земли с сенсоров MODIS установленных на спутниках Terra и Aqua [1, 2]. В настоящее время довольно остро стоит проблема наращивания производительности комплекса. Это вызвано увеличением объема входных данных и необходимостью в более глубокой обработке. Для ускорения цикла обработки предлагается реализовать процесс вычислений на кластере, получив при этом возможность конфигурирования потока вычислений.

Обработка данных производится отдельными независимыми вычислительными модулями [3]. Каждый из них принимает на вход параметры запуска и набор файлов с исходными данными («продуктами») и порождает на выходе другой набор продуктов. Для распараллеливания предлагается использовать модульность алгоритма обработки. Отдельные обработчики могут быть запущены одновременно, если для них готовы все необходимые входные продукты. Кроме того, они обрабатывают не весь снимок целиком, а требуют его разбиения на гранулы по 5-ти минутной сетке. Это позволяет обрабатывать различные гранулы параллельно. Основные проблемы при реализации такого распараллеливания это: специфицирование алгоритма обработки в виде, позволяющем выделить возможности для распараллеливания, и реализация его выполнения в распределенной среде кластера.

В качестве управляющего ядра используется система Taverna [4]. В ней алгоритм обработки представляется в виде набора «процессоров» с некоторым количеством входов и выходов, связанных зависимостями по данным. В процессе интерпретации алгоритма процессоры активируются, как только у них появляются данные на всех входных портах. Как только процессор обрабатывает, значения выходных портов передаются по дугам графа на вход другим процессорам, которые в свою очередь активируются. Также, в Taverna присутствует поддержка списковых портов у процессоров. Можно указать, что некоторый выходной порт процессора возвращает список значений, и подключить его к входному порту, принимающему только одно значение. Это приведет к параллельному или последовательному (по выбору разработчика) исполнению копий этого процессора с входными данными, соответствующими каждому элементу списка. Если же список поступает на вход целой иерархии процессоров, то отдельные элементы движутся по графу независимо по принципу конвейера – как только копия процессора получает свои данные, она немедленно исполняется. Возможна и обратная ситуация, порт, порождающий одиночные значения можно связать с портом, принимающим список. В этой ситуации интерпретатор дожидается завершения выполнения всех копий первого процессора, соберет все результаты в список и передаст второму. Поддерживается настраиваемая итерация по нескольким спискам сразу. Подробнее модель представления алгоритмов и ее семантика описаны в [5].

Описанная модель представления и исполнения алгоритмов очень хорошо подходит для задачи обработки спутниковых снимков. В этой модели вычислительные модули-обработчики напрямую проецируются на процессоры, входные и выходные продукты на соответствующие порты, а разбивка на гранулы соответствует работе со списками данных. При исполнении алгоритма, описанного в таком виде, интерпретатор Taverna автоматически распараллелит его исполнение, учитывая как модульную структуру алгоритма, так и нарезку исходных данных на гранулы. Таким образом, при наличии достаточного количества узлов время обработки сокращается до времени обхода критического пути в графе обработчиков. Сама по себе Taverna не имеет средств управления кластером и запуска на нем внешних программ, но предоставляет большие возможности для расширения собственного функционала через систему плагинов [6].

Выполнение задач на кластерах обычно управляется специализированным менеджером ресурсов, таким как SLURM [7], Torque/PBS [8] или GRAM (из Globus toolkit) [9]. Общая схема работы с этими менеджерами такова: клиент делает запрос на выполнение некоторой программы на определенном объеме машинных ресурсов (например, количестве процессоров), а менеджер в соответствии со своими политиками ставит поступающие задачи в очередь и при освобождении ресурсов исполняет их. Для интеграции этих менеджеров с Taverna была написана java-библиотека Executor API, которая подключается к ней как плагин. Она позволяет при активации процессора сформировать на основе входных данных скрипт для исполнения на узле и поставить его в очередь задач кластера, а после его завершения передать результаты через выходные порты процессора. Разработанная библиотека предоставляет абстрактный API, не зависящий от конкретного менеджера ресурсов, что позволяет использовать весь комплекс на кластерах различной конфигурации. В настоящее время реализована поддержка менеджера SLURM, а также удаленный доступ к кластеру по SSH.

Предложенный подход позволяет адаптировать вычислительный комплекс не только к одному подконтрольному кластеру, но и к более крупным архитектурам, построенным по технологии GRID [10]. Это возможно благодаря тому, что управляющее ядро полностью отделено от вычислительной части и оперирует лишь указателями на файлы с данными. Можно расширить формат указателей (сейчас это

просто положение файла на общей для кластера файловой системе) и добавить автоматическую загрузку входных данных на целевой узел. Основной проблемой при таком расширении оказывается распространение вычислительных модулей между системами участвующими в вычислении.

Разработанная система находится на стадии внедрения. Результаты тестов показывают уменьшение времени обработки до 3-4 раз. В то же время существенно увеличивается нагрузка на систему хранения, и именно она становится узким местом в работе комплекса.

Литература

1. Шокин Ю.И., Пестунов И.А., Смирнов В.В. Корпоративная информационная система СО РАН для сбора, хранения и обработки спутниковых и наземных данных // Тр. X Всерос. конф. с участием иностранных ученых «Проблемы мониторинга окружающей среды (ЕМ-2009)». Кемерово, 27-30 окт. 2009 г. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Вып. 2, Т. 1 (Т. 2).
2. Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Смирнов В.В. и др. Система информационной поддержки задач оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования // Тез. докл. Восьмой открытой Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса». Москва, 15-19 ноября 2010 г. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 40-41.
3. Лагутин А.А., Никулин Ю.А., Жуков А.П. и др. Математические технологии оперативного регионального спутникового мониторинга характеристик атмосферы и подстилающей поверхности. Ч. 1. MODIS // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 2.
4. Duncan Hull et al. Taverna: a tool for building and running workflows of services // Nucleic Acids Research. 2006. Vol. 34.
5. Sroka J., Hidders J., Missier P., Goble C. Formal semantics for the Taverna 2 workflow model // J. Computer and System Sci. 2009.
6. Paolo Missier et al. Taverna, reloaded // Scientific and Statistical Database Management. Lecture Notes in Computer Science. 2010.
7. Jette M., Grondona M. SLURM: Simple Linux Utility for Resource Management // Proc. ClusterWorld Conf. and Expo. San Jose, California, 2003.
8. Staples G. TORQUE resource manager // Proc. 2006 ACM/IEEE conf. on Supercomputing SC'06.
9. Feller M., Foster I., Martin S. GT4 GRAM: A Functionality and Performance Study // Proc. conf. «Teragrid 2007».
10. Foster I., Kesselman C., Tuecke S. The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations // Intern. J. Supercomputer Applic. 2001. Vol. 15(3).

Исследование воздействия транспортного потока на городские и загородные экосистемы

С.В. Ковтун¹, О.В. Адмаев²

¹Красноярская лаборатория судебной экспертизы при МЮ РФ;

²Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского университета путей сообщения)

Выявлена особенность стимулирующего влияния суммарных выбросов автотранспорта и веществ, поступающих из верхних слоев атмосферы, на реакцию интенсивности свечения морского люминесцирующего микроорганизма *P.phosphoreum* и рекомбинантного штамма *E.coli*. Предложена градация пороговых уровней токсичности для оценки распределенного индекса токсичности и биологического индекса. Построены карты распределения интегральной токсичности по территории микрорайонов «Северный» и «Зеленая роща» Советского района г. Красноярск, расположенных на верхних террасах Енисея, в отличие от центральной его части.

Географическая особенность г. Красноярск заключается в том, что большая его часть расположена на нижних террасах реки Енисей. С целью исключения значительного влияния промышленных выбросов, концентрируемых в верхних слоях атмосферы над центральной частью города, для проведения исследования были выбраны микрорайоны «Зеленая Роща» и «Северный», расположенные на возвышенном месте.

Интегральная оценка выбросов вредных веществ отработавших газов от автотранспортного потока проводилась в городе Красноярске и его окрестности на расстоянии, не превышающем 30 км от границы черты города, в период с 2006 по 2008 гг. Собрано более 180 проб снега в 28 городских и 6 загородных пунктах.

Повышение концентрации загрязняющих веществ зимой обусловлено ухудшением метеорологических условий рассеяния примесей, увеличением количества промышленных выбросов, замедлением химических процессов трансформации веществ при низкой температуре воздуха [1].

В качестве биотестов выступали Микробиосенсор В17-677F (на основе светящихся люофилизированных бактерий *Photobacterium phosphoreum* (P.ph) из коллекции культур ИБСО) и Микробиосенсор ЕСК (на основе генетически модифицированного штамма *E. coli* Z905 (*E. coli*)), несущего плазмиду PHL1 с лих-геном из *Photobacterium leiognathi*. Биотесты являются стандартными тест-объектами для измерения интегральной токсичности исследуемых водных образцов.

Порядок проведения эксперимента: отбор четырех проб снега с одного пункта на расстоянии 5-7 метров и 10-15 метров от проезжей части автомобильной дороги. Отбирали четыре пробы, в отдельные пакеты, на всю глубину снегового покрова. Снег для обобщающей пробы и три контрольных проб отбирали делением на равные части всей толщи снежного покрова по вертикали, при этом попадание грунта исключалось.

Образцы хранили в холодильных установках до проведения анализа. Пробы переводили в жидкую фазу при комнатной температуре. Анализ проб осуществлялся без предварительной фильтрации с целью определения формирующейся интегральной токсичности образца.

После реакции микроорганизмов с различными средами в течение 15 минут, приступали к измерению мощности свечения микробиосенсоров. Определение интегральной токсичности проводили посредством расчета биологического индекса и индекса токсичности через данные, полученные параллельными измерениями в контрольных (за основу брали дистиллированную воду) и опытных (талые воды отобранного снега) пробах, в трех повторностях.

Биологический индекс (БИ) опытного образца как количественная оценка параметра тест-реакции выражается в виде безразмерной величины и рассчитывается по формуле:

$$БИ_n = (I_n / I_k) * 100\%$$

где $БИ_n$ - остаточная относительная активность люминесценции ($n=1, 2, 3$); I_n - интенсивность свечения бактерий в опытной кювете ($n=1, 2, 3$); I_k - интенсивность люминесценции бактерий в контрольной кювете.

Обработку результатов измерений выполняли путем расчета среднеарифметического значения величины БИ по формуле:

$$БИ = (БИ_1 + БИ_2 + БИ_3) / 3,$$

где $БИ_1, БИ_2, БИ_3$ - повторности опытной пробы n ($n=1, 2, 3$). Нормой принято считать интервал БИ, принимающий значения от 80% до 120%.

Расчет индекса токсичности выражается в виде безразмерной величины индекса токсичности (T) опытных образцов и рассчитывается по формуле:

$$T_n = 100 * (I_0 - I_n) / I_0,$$

где I_0 - интенсивность свечения контроля; I_n - интенсивность свечения опыта ($n=1, 2, 3$) при фиксированном времени экспозиции исследуемого раствора с тест-объектом.

Обработку результатов измерений токсичности выполняли путем расчета среднеарифметического значения величины индекса токсичности T по формуле:

$$T = (T_1 + T_2 + T_3) / 3,$$

где T_1, T_2, T_3 - повторности опытной пробы n ($n=1, 2, 3$).

Методика допускает три пороговых уровня T :

- допустимая степень токсичности: $T < 20$;
- образец токсичен: $20 \leq T < 50$;
- образец сильно токсичен: $T \geq 50$ [2].

По результатам T и $БИ$ проводили интерполяцию полученных данных в программном комплексе Surfer 8. В качестве метода построения сети применяли геостатистический метод - Kriging, (данный метод выражает предполагаемые тренды). Полученную контурную карту накладывали на карту исследуемой территории в масштабе 1:1 (карта №№ 1, 2).

В работе рассматривали динамику изменения T в области всех полученных данных, а не только в интервале от нуля до 50 и более. Необходимо отметить зависимость: при увеличении уровня свечения какого-либо из исследуемых видов бактерий, показатель T приобретает отрицательное значение.

Следует отметить, что при совмещении контурных карт распределений, полученных данных по T и $БИ$, за выбранный период, происходит полное наложение. Данный факт свидетельствует о том, что примененные методы анализа взаимозаменяемы при определении распределений интегральной токсичности в талых снеговых водах.

Рассмотрев полученные данные через реакцию микробиосенсора *E.coli* за первый период (рис. 1 и 2) снегообразования, выявлено, что исследуемая территория находится в областях показаний $T =$ от 30 до -340% и $БИ$ от 70 до 440%.



Рис. 1. Карта № 1. Распределение $БИ$, определенного через реакцию *E.coli* за третий период наблюдения.

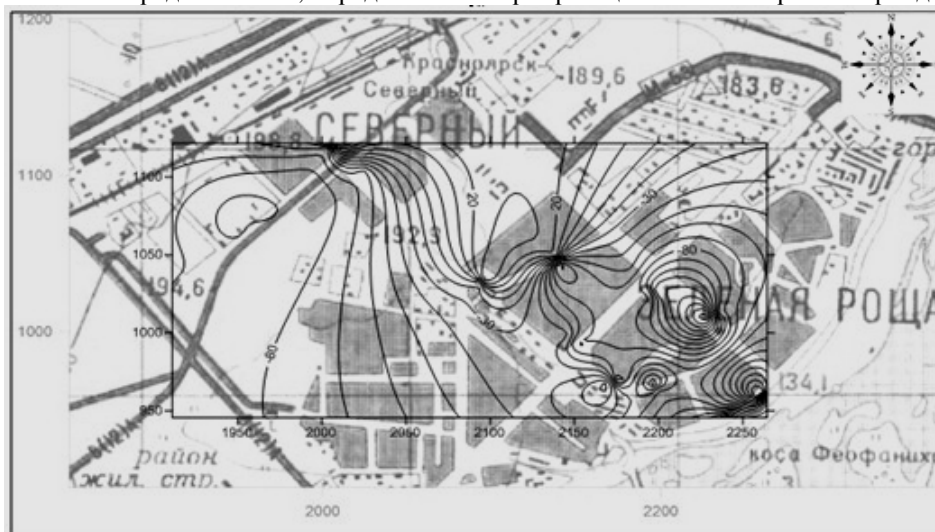


Рис. 2. Карта № 2. Распределение T , определенного через реакцию *E.coli* за третий период наблюдения.

По распределениям одного из сформированных контуров выделяется область, имеющая следующие характеристики: понижения T до -90 и -120 относятся к не токсичным (карта № 2, согласно [2]), а для $БИ$ (карта № 1) повышения более 190 и 220% относятся к токсичным, они охватывают область между улицами Водопьянова и Урванцева в северо-западном направлении от улицы 9 Мая.

Анализируя сформированные области полученных контуров, сталкиваемся с противоречием в трактовке результатов. Выяснилось, что контур с отрицательными значениями для $T = -20$ (карта № 2), накладывается на контур $БИ = 120\%$ (карта № 1). Подобная ситуация прослеживается по всем сформированным областям.

Приходим к выводу о необходимости пересмотреть градацию пороговых уровней трактовки результатов для T и $БИ$, с расширением критериев в диапазоне отрицательных значений для T и показателей выходящих за интервал показаний $80-120\%$. Считаем, что расширение областей трактовки результатов позволит детальнее проследить динамику изменения интегральной токсичности по исследуемой территории.

Интервал от 80 до 120% для $БИ$ при наложении на зоны сформированные по T , попадают в интервал T от -20 до 20 который следует отнести к «допустимой степени токсичности», следовательно, показания, выходящие за принятый интервал, следует относить к токсичным и сильно токсичным по градации принятой для T по [2]. Исходя из вышеперечисленного, формируем дополнительные пороговые уровни для трактовки полученных результатов по T и $БИ$ (табл. 1, столбцы 3 и 4).

В дальнейшем анализ распределений интегральной токсичности на исследуемой территории, учитывая перечисленные выше обстоятельства, осуществляется только по картам, построенным для T и по указанной в табл. 1 (столбец 4) градации.

По реакции рекомбинантного штамма *E.coli* (рис. 3), и морского люминесцирующего микроорганизма *P.phosphoreum* (рис. 4), при анализе проб отнесенного к периоду окончания зимы снега, происходит формирование областей распределения концентраций, указанных в табл. 2.

Табл. 1. Пороговые уровни токсичности для оценки распределенного индекса токсичности и биологического индекса.

Пороговые уровни				Градировка
Оригинал		Модернизировано		
T (по [2])	$БИ$, %	T	$БИ$, %	
$T \leq 20$	$80 - 120$	≤ 20	≤ 120	допустимая степень токсичности
–	–	≥ -20	≥ 80	допустимая степень токсичности с усилением свечения
$20 < T < 50$	–	20 по 49	$120 - 149$	образец токсичен
–	–	« -20 » по « -49 »	$80 - 51$	образец токсичен с усилением свечения
$T \geq 50$	–	≥ 50	≥ 150	образец сильно токсичен
–	–	\leq « -50 »	≤ 50	образец сильно токсичен с усилением свечения



Рис. 3. Карта № 3. Распределение определенной через реакцию *E.coli* за третий период наблюдения интегральной токсичности.

Табл. 2. Сформированные области распределения концентраций интегральной токсичности по реакциям рекомбинантного штамма *E.coli* и морского люминесцирующего микроорганизма *P.phosphoreum*.

№ п/п	Сформированные области распределения концентраций	Индекс токсичности (T)	Градуировка области
<i>E.coli</i> (рис. 3)			
1	в юго-западном направлении от пересечения улицы Краснодарская и проспекта Комсомольский	- 10	допустимая степень токсичности с усилением свечения
2	направлена в юго-западном направлении от проспекта Комсомольский, на территорию жилого дома по адресу 9 Мая, 12. Область удлиняется и расширяется в юго-западном направлении	- 40	токсичен с усилением свечения
3	проходит по территории зеленых насаждений у дома 9 Мая, № 37	- 20	допустимая степень токсичности с усилением свечения
4	по улице Воронова в северном направлении в районе ост. «9 микрорайон», на проезжей части ул. Воронова, с пиком в пространстве между домом № 16	50	сильно токсичен
5	на территории, приближенной к скверу у Дворца труда, со стороны проезжей части проспекта Metallургов	- 50	сильно токсичен с усилением свечения
6	по улице Тельмана напротив остановки «5-й микрорайон» со смещением в сторону улицы Устиновича, вытянутая форма в различные стороны улицы Тельмана	70	сильно токсичен
7	происходит формирование трех областей: T(1) на территории приближенной к скверу «Космонавтов», на дворовой территории домов №№ 15, 17 по ул. Николаева и дома № 27 по проспекту Metallургов;	- 70 (1)	образец сильно токсичен с усилением свечения
8	для T(2) и T(3) образованы две области по обе стороны проезжей части ул. Терешкова в районе пересечения с ул. Устиновича на территории по адресу ул. Терешкова, 4 и 4а, и с противоположной стороны, расположен на территории сквера Космонавтов, пересекая улицу Николаева, соответственно	90 (2)	сильно токсичен
9	на территории сквера Космонавтов, пересекая улицу Николаева, соответственно	- 60 (3)	сильно токсичен с усилением свечения
10	на окраине микрорайона Зеленая роща, непосредственно перед парковой зоной, юго-западнее пересечений ул. Ферганская и проспекта Ульяновский	40	токсичен
11	на территории у административного здания по адресу ул. Комарова, 6а	- 70	сильно токсичен с усилением свечения
12	на проезжей части напротив проспекта Metallургов, 4	- 30	токсичен с усилением свечения
<i>P.phosphoreum</i> (рис. 4)			
1	область между улицами Водопьянова и Урванцева в северо-западном направлении от улицы 9 Мая, остановка «Детская поликлиника»	-140	сильно токсичен с усилением свечения
2	на проезжей части проспекта Комсомольский в юго-западном направлении от дома по 9Мая, 37	40	токсичен
3	между домами №№ 18 и 16 по улице Воронова	80	сильно токсичен
4	формирование области на пересечении улиц Тельмана, Устиновича и Ульяновский проспект	100	сильно токсичен
5	на дворовой территории домов №№ 15, 17 по улицы Николаева и дома № 27 по проспекту Metallургов	-280	сильно токсичен с усилением свечения
6	на окраине микрорайона Зеленая роща, непосредственно перед парковой зоной, юго-западнее пересечений ул. Ферганская и проспекта Ульяновский	40	токсичен
7	на территории, расположенной вблизи административного здания по адресу ул. Комарова, 6а	-140	сильно токсичен с усилением свечения

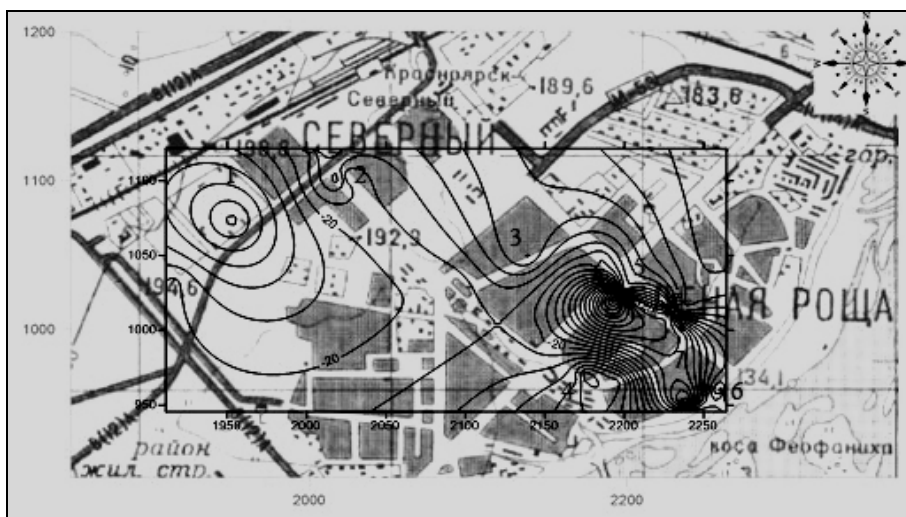


Рис. 4. Карта № 4. Распределение определенной через реакцию $P.ph$ за третий период наблюдения интегральной токсичности.

Различия в расположении областей формирования зон распределения концентраций токсичности могут свидетельствовать о разных аэродинамических свойствах осаждаемых веществ, на которые реагируют отдельные штаммы бактерий. А также и на неоднотипное влияние химических компонентов в пробах снега.

Как известно, комплексобразование способно влиять на окислительно-восстановительный потенциал водной системы и может привести к изменению таких характеристик металла, как растворимость, и доступность его для биологических организмов [3].

По анализу рис. 3, 4, следует, в областях, расположенных вблизи автомагистралей с повышенной интенсивностью автотранспортного потока (ул. 9 Мая, пересечение улицы Краснодарская и проспекта Комсомольский, переходящее в улицу Воронова, и территории, примыкающие к скверу Космонавтов), в отличие от районов с низкой интенсивностью (пересечение ул. Ферганская и проспекта Ульяновский), проявляются области токсичности снежного покрова без стимуляции свечения. На подобное распределение групп веществ могли повлиять ветра юго-западного направления, при которых происходит смещение основной массы выбрасываемых веществ от автотранспорта, на территориях с малой интенсивностью, по направлению ветра, осаждаются вещества с верхних слоев атмосферы. Данный факт подтверждает то, что при совместном осаждении веществ, поступающих от автотранспорта и верхних слоев атмосферы, в процессе таяния снега происходит их взаимодействие с последующим образованием соединений и веществ, влияющих на микробиосенсоры как стимуляторы свечения.

При изучении распределения интегральной токсичности на исследуемой территории, становится очевидным факт, что автотранспортные средства привносят комплекс веществ, способный оказывать стимулирующее влияние. Вещества, сконцентрированные в верхних слоях атмосферы, предположительно, в большей степени от промышленности, оказывают влияние, подавляющее активность свечения используемых микробиосенсоров.

Использование двух методов анализа полученных результатов позволило выявить противоречия применяемых методов. Предложенный альтернативный вариант оценки уровней градации интегральной токсичности, позволяет провести анализ влияния выбросов от автотранспортных потоков на образование областей концентраций токсичности в снежном покрове на исследуемой территории.

Литература

1. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России: Учебное и справочное пособие. 2-е изд. М.: Финансы и статистика, 2000. 672 с.
2. МР 01.021-07 «Экспрессного определения интегральной химической токсичности питьевых, поверхностных, грунтовых, сточных и очищенных сточных вод с помощью бактериального теста "эколюм"».
3. Экогеохимия городских ландшафтов / Под ред. Н.С. Касимова // М.: Изд-во МГУ, 1995. 336 с.

Информационные слои распределенной ГИС для оценки запасов углерода в почвах бореальной зоны Западной Сибири

С.Я. Кудряшова, К.С. Байков, А.А. Титлянова, Л.Ю. Дитц, И.Д. Махатков, Н.П. Косых, С.В. Шибарева

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск

На территории России, так же как и в других странах севера Евразии, наибольший сток углерода отмечается в почвах и лесах бореальной зоны [1, 2, 3]. По обобщенным оценкам Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН более 70% углерода фитомассы и около 80% углерода почв приходится на хвойные леса. В представленном балансе очень существенна роль бореального биома Западной Сибири, почвенный покров которого характеризуется широким развитием торфяных и торфяно-болотных почв, отличающихся высоким и сверхвысоким - 180 - 800 т/га (по шкале уровней содержания Сорг) содержанием органического углерода.

Учитывая высокую значимость почвенного и растительного покрова в углеродном балансе бореальной зоны, для оценки запасов Сорг в почвах совместно с ИВТ СО РАН и ЦСБС СО РАН создана интегрированная картографическая основа растительного и почвенного покрова и совместимое с картографической основой программное обеспечение для тематической обработки специализированных баз данных по запасам Сорг в почвах и фитомассе. В структуре распределенной ГИС условно могут быть выделены блоки: 1 – электронные слои “Растительность” и “Почвы” бореальной зоны Западной Сибири; 2- программные средства для актуализации и управления базой данных “Углерод в почвах Сибири”; 3 - среднемасштабные почвенные карты ключевых участков основных ландшафтных провинций Западной Сибири; 4 - макет электронной карты “Запасы Сорг в почвах бореальной зоны Западной Сибири”. В докладе представлены основные результаты исследований по отработке дистанционных исследований для создания цифровой картографической основы почвенного покрова бореальной зоны.

“Растительность” и “Почвы” бореальной зоны Западной Сибири. Учитывая тесную зависимость запасов Сорг в почвах от типов фитоценозов, тематические слои были созданы на основе генерализованной легенды карты “Растительность Западно-Сибирской равнины”, 1976 г., предоставленной для использования ЦСБС СО РАН. При разработке легенды карты (1:7500000) использованы два базовых иерархических уровня - подзональные особенности лесной растительности, распространенной на равнинах и низких плато и единицы региональной размерности, представляющие доминирующие эколого-географические типы растительности или характерные сочетания нескольких экологически различных типов. Полная легенда включает 29 подразделений, объединенных в 5 категорий. Электронный слой “Почвы” (1:7500000) является сопряженным к карте “Растительность” и создан по единым принципам построения легенды, ее структуры, объема и содержания основных картируемых единиц, реализованных в карте растительности. Его легенда также включает 29 подразделений, объединенных в 5 категорий. На территории исследования, так же как и в других биоклиматических зонах, типы растительности и типы биологического круговорота тесно связаны с типами почвообразования. Географически такая закономерность выражается в том, что зонам растительности соответствуют почвенные зоны с преобладанием определенного зонального типа почв. Подобную закономерность можно отчетливо проследить, сопоставляя содержание электронных карт почв и растительности. В пределах зонально-подзонального деления так же отмечается высокая степень соответствия границ и информационного содержания контуров почвенного и растительного покрова.

Актуализация базы данных “Углерод в почвах Сибири”. Расчеты запасов Сорг были проведены на основе базы данных “Органический углерод”, к которой дополнительно был создан специализированный блок данных по содержанию гумуса в почвах бореальной зоны - большой массив собственных и литературных данных, полученных по результатам исследований за последние 15 лет. В целом, база данных “Органический углерод в почвах бореальной зоны” в настоящее время включает 480 величин содержания гумуса и объемной массы в 70 разрезах почвенного покрова бореальной зоны Западной Сибири. Каждый разрез имеет координатную привязку к соответствующему контуру почвенного и растительного покрова.

Среднемасштабные почвенные карты ключевых участков основных ландшафтных провинций Западной Сибири. Отработка дистанционной информации для оценки запасов Сорг была проведена на ключевых участках, расположенных в пределах ландшафтных провинций бореальной зоны. Выделение типологических регионов проводилось с учетом принципов ландшафтного районирования на основе сопряженного анализа, региональных структур, объективно отражающихся на космических снимках и фиксируемых на ландшафтно-типологических картах.. Среднемасштабные почвенные карты ключевых участков были созданы по материалам ландшафтно-индикационного дешифрирования космических снимков Landsat с последующей векторизацией в ArcGisC. По материалам дистанционных исследований были выделены лесотундрово-таежные, таежные, аллювиально-пойменные и болотные комплексы почв (см. рисунок). С использованием ландшафтно-индикационного метода дешифрирования были выделены

контуры комплексов или сочетаний почв, имеющие четко выраженные границы. При дешифрировании болотных образований, специфичность которых тесно связана с ландшафтной структурой территории в качестве прямых дешифровочных признаков были использованы: конфигурация болот, степень слитости или изолированности мезоландшафтов болотных систем, которые отражаются на классифицированном снимке в виде отдельных контуров. В структуре распределенной ГИС почвенные карты ключевых участков являются базовым информационным слоем, в котором закономерности функциональных и корреляционных связей природных объектов (в нашей работе почвы – растительность) остаются тождественными с переходом от одного масштаба к другому. Установленные индикационные связи рельеф – растительность – почвы позволили интерпретировать распределение почв на ключевых участках ландшафтных провинций бореальной зоны.

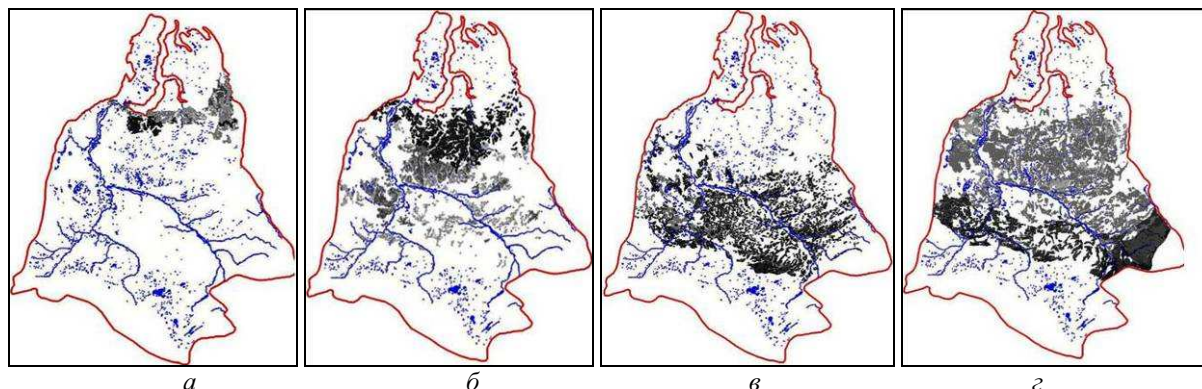


Рис. Пространственное распределение: *а* – комплексов почв лесотундрово-таежных; *б* – комплексов почв таежных; *в* – торфяно-болотных почв; *г* – автоморфных и полугидроморфных почв в границах бореальной зоны Западной Сибири.

Корректирование границ и информационного содержания почвенных контуров с использованием космического снимка. К основным факторам, приводящим к значительной неопределенности в описании цикла углерода, относятся неточности в определении типологии и площадного соотношения единиц дифференциации почвенно-растительного покрова. Поэтому специальной задачей нашего исследования являлась коррекция границ и информационного содержания почвенных контуров на основе космических снимков на локальном уровне, а также в пределах ландшафтных зон, подзон и провинций. На основе цифровой обработки были откорректированы границы и содержание контуров торфяно-болотных переходных и торфяно-болотных деградирующих, занимающих обширные площади в составе комплекса крупно-бугристых болот. Проведено уточнение площадей торфяных болотных переходных и торфяных болотных верховых почв. Получены значимые различия для площадей, занимаемых подтипами подзолов и других типов почв.

Использование материалов дистанционных исследований для оценки запасов Сорг. Доминирующим компонентом бореальной зоны являются почвенные комплексы – структуры почвенного покрова, в которых наблюдается чередование резко различающихся почв, взаимосвязанных в своем генезисе и создающих специфические ландшафтные образования. На территории исследования были выделены лесотундрово-таежные, таежные, аллювиально-пойменные и болотные комплексы почв, существенно различающиеся по запасам Сорг. Наиболее высокий вклад в общий запас Сорг вносят комплексы почв грядово-мочажинных и грядово-озерковых торфяных верховых и переходных болот, а так же крупнобугристых и деградирующих торфяников, которые формируют более 30% общего запаса Сорг региона. Высокоорганогенные торфяные болотные переходные и верховые почвы занимают около 10% площади региона и формируют до 54% запаса Сорг в почвах ландшафтных провинций. В зональном ряду почв наибольшую площадь занимают подзолы (10% общей площади), затем – дерново-подзолистые (3%) и темно-серые и серые почвы (2,3%). Подзолы отличаются низким содержанием углерода, однако, занимая обширные площади, они формируют наиболее высокий по сравнению с остальными почвами запас Сорг.

Оценка Сорг в почвах ландшафтных провинций. В границах ландшафтных провинций запасы Сорг формируются в тесной зависимости от типологии и площадного соотношения почвенных ареалов. Максимальные запасы Сорг сосредоточены в наиболее крупных по занимаемой площади провинциях – Васюганской и Среднеобской (63% запаса Сорг ландшафтных провинций). Рассмотрим возможности использования площадей почвенных контуров полученных по данным оцифровки и дешифрирования для оценки запасов Сорг на примере ключевого участка Среднеобской ландшафтной провинции. В почвенном покрове ключевого участка широко представлены разной степени мощности торфяные болотные верховые почвы. Общий запас углерода в почвах ключевого участка – 751,2 т С на выдел. Почвы верховых торфяников занимают 53% от общей площади. Их вклад в бюджет углерода составляет более 82%. Торфяные и торфянистые почвы низинных болот формируют 11% от общего запаса С орг.

Вклад остальных почвенных типов около 3%. По предварительной оценке запас Сорг в почвах бореальной зоны составляет 83,6-108 т соответственно это 28,2% запасов Сорг в почвах России или 15,2% его мировых запасов.

Обобщая обоснование возможности использования распределенной ГИС для оценки запасов Сорг в почвах и фитомассе бореальной зоны необходимо еще раз обратить внимание на совместимость границ и информационного содержания интегрированной картографической основы почвенного и растительного покрова на разных уровнях ландшафтной дифференциации. Среднемасштабные карты почв ключевых участков, созданные на основе материалов дистанционных исследований, принципов ландшафтного районирования и методов ландшафтно-индикационного дешифрирования, могут использоваться в качестве базовой информационной основы для оценки запасов Сорг в почвах ландшафтных провинций и бореального региона в целом.

Литература

1. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вест. РАН. 2006. С. 14-29.
2. Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23 P. 2033-2043.
3. Carlson M., Chen J.M., Elgie S. et al. Maintaining the role of Canada's forests and peatlands in climate regulation // *Forestry Chronicle*. 2010. P. 434-443.

Использование картографического сервера с открытым кодом для создания ГИС «реестр водных объектов Обь-Иртышского бассейна»

О.В. Ловцкая, Н.А. Балдаков, К.Б. Кошелев

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Барнаул

В результате многолетних работ в Институте водных и экологических проблем СО РАН собран, обработан и проанализирован значительный объем фактографической, аналитической и картографической информации. На рис. 1 представлена структура базы данных, создаваемой для комплексной обработки пространственных и пространственно-временных данных, извлечения из данных нетривиальных закономерностей и использования выделенной информации для прогноза пространственно-временных процессов и явлений.

Обобщить и проанализировать значительные объемы информации в условиях их географической и структурной разобщенности невозможно без создания единой системообразующей основы. В качестве такой основы выступают реестровые ГИС как инструмент доступа к базам данных, обеспечивающий реализацию запросов на поиск и отображение необходимой информации. Функциональность ГИС обеспечивается встроенными средствами используемого базового программного обеспечения и включает основные операции поиска и визуализации объектов. Для реализации картографической функциональности можно использовать существующие коммерческие ГИС-продукты. Однако в настоящее время коммерческие настольные ГИС (desktop-продукты) становятся все сложнее и все неохватнее по своей функциональности, а серверные решения для ГИС часто жестко связаны с базовой ГИС по подготовке карт для публикации. К тому же, они оказываются слишком сложными для использования в тех организациях, где нет большого опыта работы с пространственными данными.

ГИС "Реестр водных объектов Обь-Иртышского бассейна" разработана в среде ArcGIS 9.x. С помощью дополнительного модуля ArcGIS Publisher выполнено преобразование документов карт формата MXD (формат ArcGIS) в формат PMF, что позволяет публиковать файлы карт и обмениваться ими через локальные и глобальные сети. Файлы опубликованных карт (PMF) содержат информацию о местоположении и способах отображения слоев данных (символы, способы отображения, масштабные зависимости и т.д.), включая подключения к базам геоданных и ГИС серверам (сервисы ArcIMS, сервисы ArcGIS серверов, данные Географической сети в Интернет/Инtranет). С файлами опубликованных карт можно работать в бесплатном приложении ArcReader. Все перечисленные средства, кроме ArcReader, являются коммерческими продуктами, что существенно ограничивает сферу их применения. Программный продукт ArcReader является desktop-приложением ограниченной функциональности и может использоваться, в основном, для презентации ГИС-проекта.

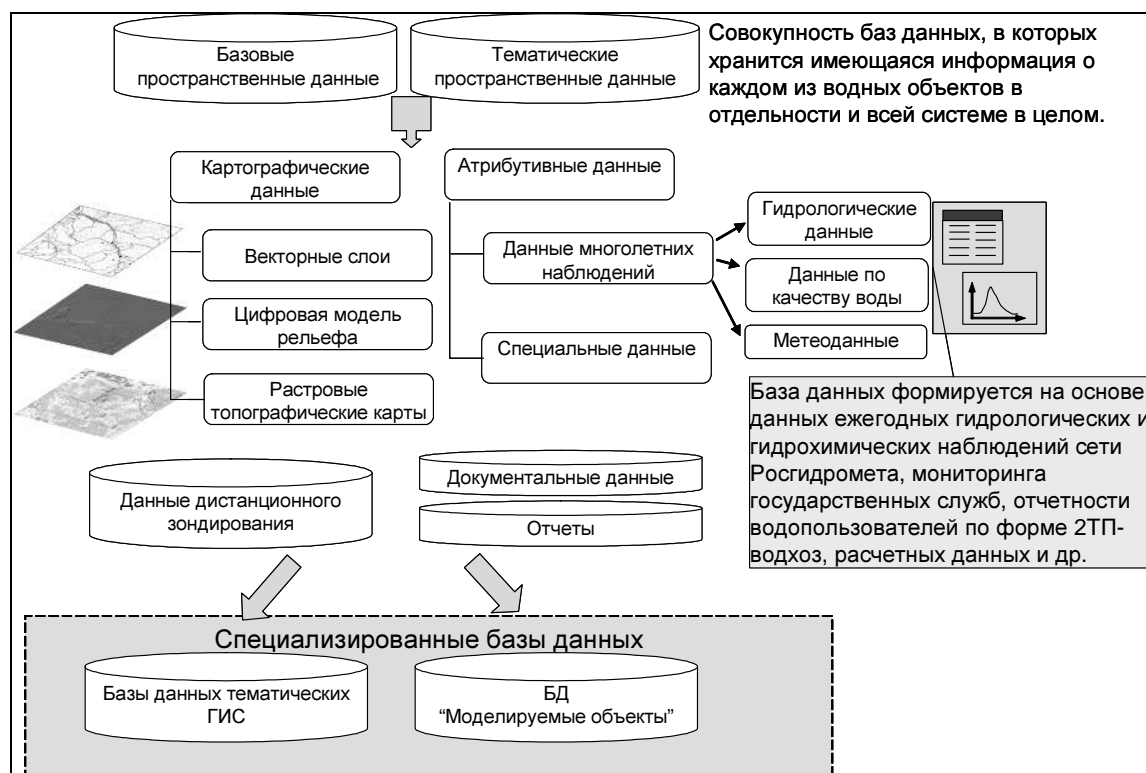


Рис. 1. Структура базы данных.

Для того чтобы перейти от информационно-справочной системы к информационно-аналитическим, необходимо использование моделирующих комплексов, предназначенных для выполнения сложных прогнозных и аналитических задач в рамках сетевых ГИС-приложений. Основные отличия сетевых аналитических ГИС от настольных ГИС обусловлены, главным образом, изменением типа пользователя от эксперта в области ГИС технологий к эксперту в предметной области. В связи с этим система, с одной стороны, должна включать достаточный набор функций для решения задач эксперта предметной области, с другой стороны, эти функции должны реализовываться с помощью удобных и достаточно понятных для эксперта операций. Возникает задача выбора наиболее адекватного по стоимости и функциональности технологического и архитектурного решения для создания распределенного ГИС-приложения.

Последние годы характеризуются интересом к веб-картографии и ее возможностям в целом, а также значительным ростом числа сервисов, в той или иной форме использующих картографические веб-технологии. Наиболее важной тенденцией является появление большого числа бесплатных проектов, реализующих концепцию предоставления преобразованных данных; увеличение возможностей персонификации сервисов; возможности интеграции собственных данных с существующими сервисами [1].

Типичное интернет-приложение включает в себя три функциональных составляющих (сервиса): презентационный сервис (клиентский интерфейс), сервис прикладной логики (серверное приложение) и сервис данных [3].

Функции каждой составляющей описаны в таблице.

Таблица. Составляющие интернет-приложения.

Тип сервиса	Функции
Презентационный сервис	Отображение информации, доступ к функциональности, поддержка навигации по данным, защита целостности пользовательского интерфейса
Прикладная логика	Исполнение и поддержка нужных расчетных и управляющих алгоритмов, генерация новых данных, получаемых в результате вычислений и обеспечение их целостности
Сервис данных	Поддержка структуры данных, обеспечение доступа к данным, защита целостности данных

Презентационный сервис отвечает за взаимодействие приложения с пользователем. Сервис прикладной логики выполняет основную функциональность приложения, сервис данных, реализуемый, как правило, через систему управления базами данных, обеспечивает взаимодействие приложения с данными.

Архитектура распределенного ГИС-приложения выглядит следующим образом: клиент – Web-сервер – сервер приложений ГИС – сервер пространственных данных. Сервер приложений ГИС реализует базовый набор функций ГИС, которые объединяются в программные компоненты, предоставляющие для использования свои методы и свойства. Этот подход позволяет использовать на клиентских компьютерах достаточно простые приложения, в том числе и стандартные Интернет-браузеры, сосредоточив основную массу вычислений на сервере. За счет того, что вычисления выполняются на сервере, значительно уменьшается объем передаваемых данных, так как пользователю передается только конечный результат обработки его запроса, а не все данные, необходимые для его исполнения.

Актуальной задачей является создание сервиса, реализованного на базе программного обеспечения с открытым кодом, который через веб-интерфейс предоставляет доступ к картографическим растровым и векторным данным, средства пространственного и атрибутивного поиска, средствам анализа этих данных и визуализации результатов анализа. Указанный сервис разрабатывается в соответствии с шаблоном проектирования «Модель-Представление-Контроллер», в котором модель данных приложения (Модель), пользовательский интерфейс (Представление) и управляющая логика (Контроллер) разделены на три отдельных компонента [2].

В качестве компонента «Контроллер» использован Geoserver – кроссплатформенный картографический сервер с открытым кодом. С технической стороны Geoserver является Java сервлетом и, следовательно, совместим с любой платформой, поддерживающей стандартные сервлет-контейнеры – например, Tomcat или Jetty. Протоколы, по которым работает Geoserver, реализуют спецификации WMS, WFS, и WCS, предложенные Open Geospatial Consortium (OGC) и, фактически, ставшие международным стандартом в области GIS-технологий. Geoserver имеет модульную структуру, позволяющую разрабатывать блоки, реализующие недостающую функциональность, и документированным способом включить их в базовый продукт [4].

Архитектура ГИС на основе Geoserver представлена на рис. 2.

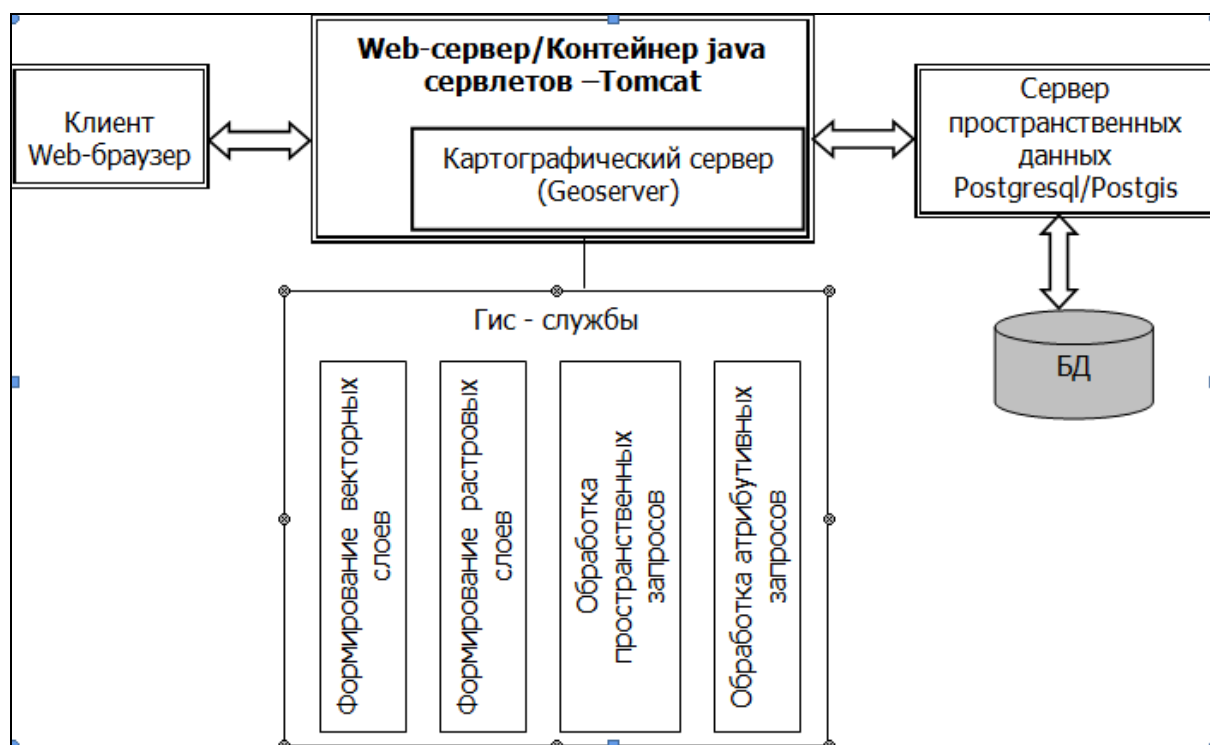


Рис. 2. Архитектура ГИС.

При работе с пространственными данными Geoserver оперирует четырьмя основными абстракциями: «Источник данных», «Слой», «Стиль слоя» и «Рабочее пространство».

Источником данных для Geoserver могут быть как файлы, так и таблицы баз данных под управлением СУБД, имеющих пространственные расширения: Oracle, MySQL, PostgreSQL/PostGIS [5]. Объектно-реляционная СУБД, в настоящее время известная как PostgreSQL, ведет свою историю от пакета POSTGRES, разработанного в Калифорнийском университете (1986 г). Более чем двадцатилетняя разработка PostgreSQL сделала этот продукт одной из наиболее функциональных СУБД с открытым исходным кодом.

PostgreSQL поддерживает большую часть стандарта SQL и предлагает множество современных возможностей:

- комплексные запросы,
- внешние ключи,
- триггеры,
- представления (views),
- транзакционная целостность,
- многоверсионное управление параллельным доступом.

Возможности PostgreSQL могут быть расширены пользователем путем добавления новых элементов:

- типов данных,
- функций,
- операторов,
- агрегатных функций,
- индексных методов,
- процедурных языков.

PostGIS [6] добавляет поддержку пространственных объектов в PostgreSQL объектно-реляционную базу данных. Фактически, PostGIS – пространственное расширение PostgreSQL-сервера, что позволяет использовать его как пространственную базу данных для ГИС.

Среди некоммерческих продуктов, предоставляющих возможность хранения пространственной информации, связка PostgreSQL/Postgis обладает наиболее широкой функциональностью, в связи с чем, используется в проекте в качестве модели данных приложения.

Для обеспечения преемственности разрабатываемой сетевой ГИС с ее desktop-версией пространственные данные, подготовленные в формате shape-файлов, импортированы в таблицы базы данных.

PostgreSQL в стандартной поставке укомплектован средством администрирования баз данных – приложением с графическим интерфейсом pgAdmin III, включающим инструменты импорта (рис. 3).

Управление и настройка Geoserver может выполняться программно, посредством запросов по HTTP протоколу либо вручную, через web-интерфейс (рис. 4). В Geoserver логической единицей,

соответствующей отдельному GIS проекту, является «Рабочее пространство» (workspace). Оно содержит источники данных, набор слоев и набор стилей – XML файлов, описывающих визуальное представление и символику слоя.

Абстракция Geoserver «Слой» объединяет в себе непосредственно географические данные, один или более присоединенных к слою стилей и, опционально, ссылку на метаданные. На рис. 5 показана страница web-интерфейса, отвечающая за конфигурацию слоя.

Стиль слоя в Geoserver создается на XML-подобном языке разметки «Style Layer Descriptor» (SLD). Стиль задает цвета геометрических объектов, тип и толщину линий, символику для точечных слоев, текстовые подписи. В стандарт SLD включена возможность представлять тот или иной объект в зависимости от приданной ему атрибутивной информации и текущего для пользователя масштаба карты, что позволяет выполнять генерализацию и решать другие геоинформационные задачи. На рис. 6 показан web-интерфейс Geoserver в процессе редактирования стиля.

В качестве компонента «Представление» выступает AJAX-приложение (Asynchronous Javascript And Xml Applications), которое не требует ни отдельного клиента, ни дополнительных плагинов для браузеров. К настоящему моменту реализованы базовые возможности, общие для большинства GIS-систем. На рисунках 7-12 представлен интерфейс приложения.

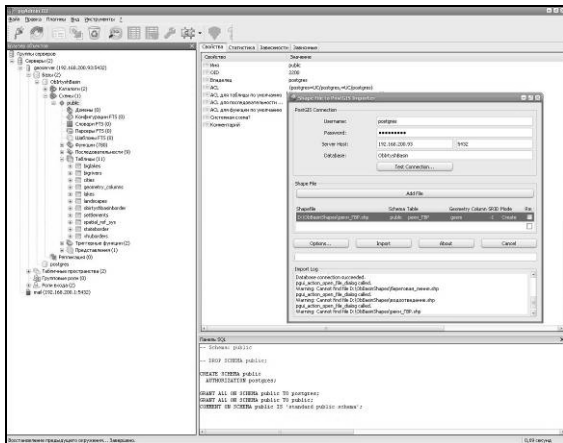


Рис. 3. Загрузка базы данных (импорт shp-файлов).

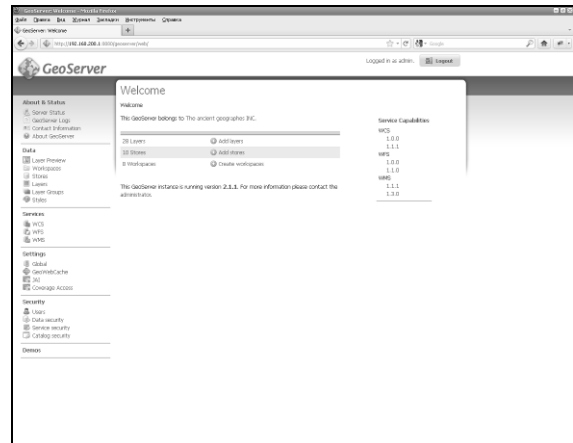


Рис. 4. Web-интерфейс настройки GeoServer.

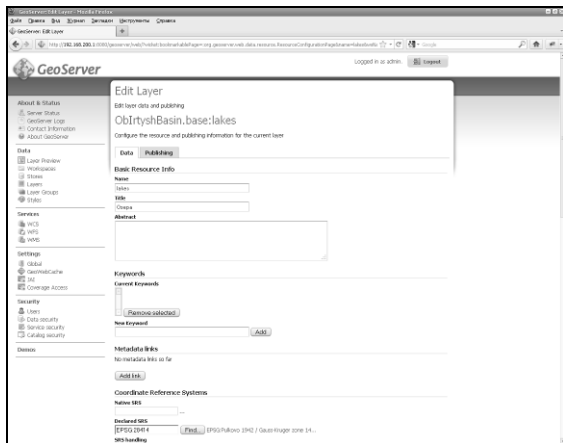


Рис. 5. Web-интерфейс конфигурации слоя.

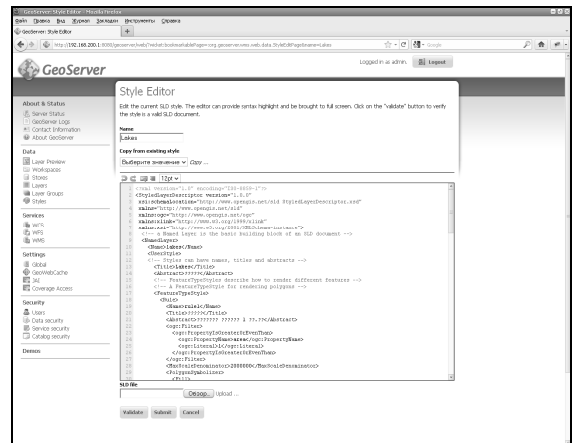


Рис. 6. Интерфейс редактирования стиля.

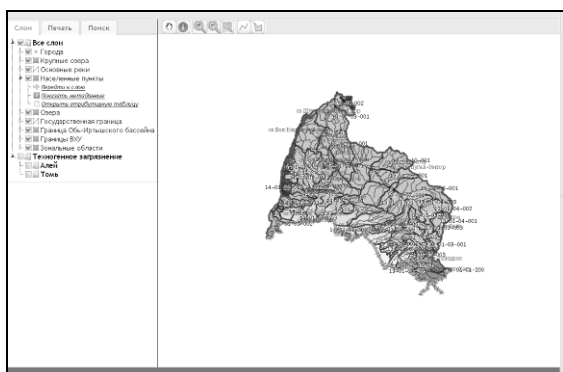


Рис. 7. Главная страница ГИС «Реестр водных объектов Об-Иртышского бассейна».

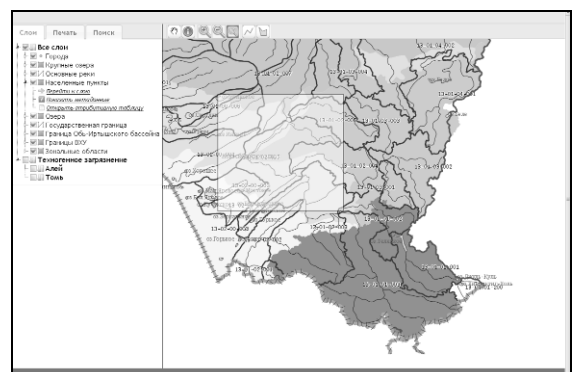


Рис. 8. Изменение масштаба карты.

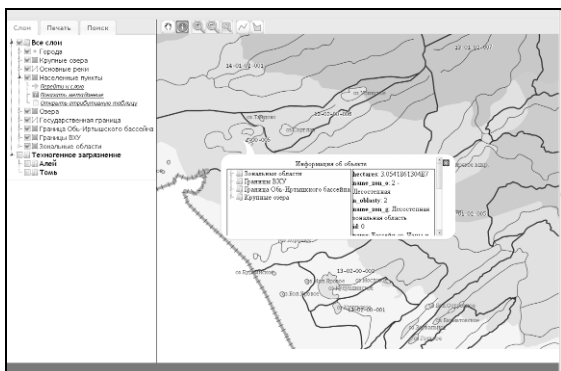


Рис. 9. Получение информации об объекте.

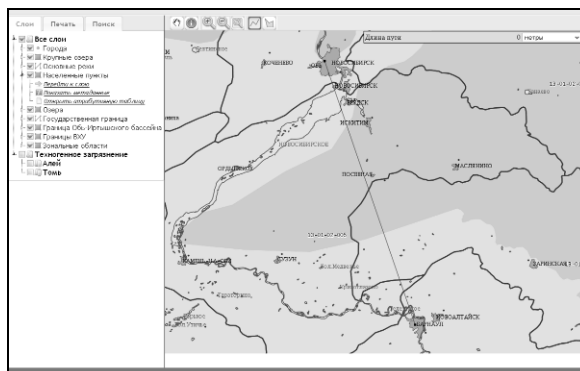


Рис. 10. Измерение расстояний.

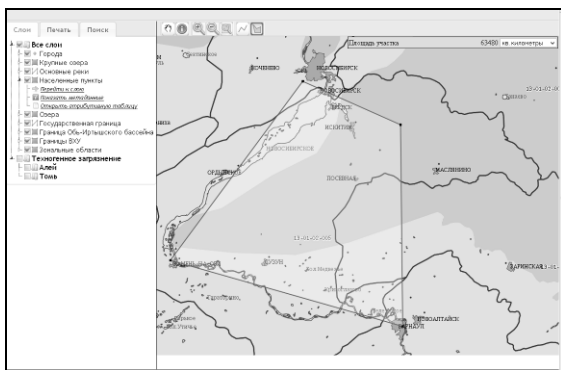


Рис. 11. Измерение площадей объектов произвольной формы.

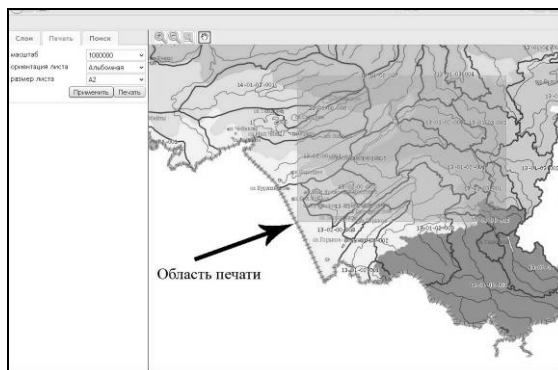


Рис. 12. Подготовка карты к печати.

С ГИС «Реестр водных объектов Обь-Иртышского бассейна» на базе картографического сервера с открытым кодом можно ознакомиться на сайте Института водных и экологических проблем СО РАН по адресу <http://mail.iwep.ru/geoserver/www/web-gis/index.htm>.

Работа выполнена при финансовой поддержке Сибирского отделения РАН (проект № IV.31.2.12 «Разработка проблемно-ориентированных ГИС и информационно-моделирующих комплексов для изучения водных объектов Сибири на основе новых методов интеграции пространственных междисциплинарных данных», координаторы – акад. Ю.И. Шокин, чл.-кор. РАН И.В. Бычков).

Литература

1. Веб-ГИС. <http://gis-lab.info/qa/webgis.html>
2. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
3. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. СПб.: Питер, 2001. 368 с.
4. What is GeoServer. <http://geoserver.org/display/GEOS/What+is+GeoServer>
5. Краткий обзор возможностей PostgreSQL. <http://postgresql.ru.net>
6. What is PostGIShttp. <http://postgis.refrains.net>

Использование ГИС-технологий в области обращения с отходами

А.В. Михайлов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул

Многие задачи природоохранной деятельности тесно связаны и базируются на фундаментальных принципах системного анализа, управления, экологии, методах математики и информатики. При моделировании экологических процессов на урбанизированной территории необходимо учитывать ряд важных принципов [1]:

1. прикладную экологию следует понимать как науку, занимающуюся изучением поведения человека по отношению к окружающей среде и выработке рациональных (экологически обоснованных) норм поведения в окружающей среде, а прогресс этой науки невозможен без методов информатики, имитационного моделирования и прогнозирования;
2. ввиду сложности и тесной взаимосвязи всех природных процессов в биосфере для отработки эффективных технологий моделирования в первом приближении можно ограничиться простыми для изучения и использования моделями, гипотезами;
3. зачастую невозможно или экономически нецелесообразно провести соответствующий мониторинг, поэтому необходимо исходить из общедоступной входной информации, использовать методы информатики, математики ее получения при недостатке информации;
4. необходимо использовать как классические представления или описания математических моделей, так и неклассические модели и методы, например, графы и структуры данных, использовать экспертные процедуры а также различные операции моделирования;
5. обучение и адаптация простых моделей должны сочетаться с использованием качественного алгоритмического (а также - программного) обеспечения, гибких технологий использования их, например, имитационных технологий;
6. интерфейсно - ориентированное обеспечение этих моделей должно быть дружелюбно и привлекательно для пользователя - непрофессионала;
7. компьютерная модель должна быть пригодной для развития экологической, математической, компьютерной, информационной, технологической культуры пользователей;
8. модель должна поддерживать весь жизненный цикл процессов – от содержательной постановки задачи до проектных решений;
9. математическое моделирование, если учитывать длительность экологических процессов, становится мощным, а часто и единственным, средством установления связей между природными процессами и природоохранной деятельностью общества.

Разработанный нами программный комплекс «Мониторинг отходов» (далее ПК «Мониторинг отходов») представляет собой единую гео-информационную систему и аналитический блок с возможностью совместной работы с программами «Кедр-регион» (НПП «Логус», г. Москва) и «GisMaster» (ТОО «ФИРМА «ИНГИТ»»).

Внедренная в ПК «Мониторинг отходов» система поддержки принятия решений позволяет:

- 1) прогнозировать объемы образования и структуры отходов;
- 2) производить оценку технологий;
- 3) разрабатывать программы разделения потоков отходов для утилизации и рециклинга;
- 4) оценивать издержки перерабатывающих заводов и сортировочных станций;
- 5) определять мощности перерабатывающих предприятий;
- 6) моделировать существующую или проектируемую систему управления отходами.

Основой разрабатываемого нами программного комплекса является интеграция трех различных подходов к пространственно-временному анализу региональной системы управления отходами производства и потребления, а именно: анализа жизненного цикла, который помогает определить характеристики образующихся отходов, оптимизации, которая поможет найти компромиссное решение между экономическими, экологическими и социальными целями развития системы и геоинформационного подхода (GIS), который обеспечит оптимальное размещение перерабатывающих отходы предприятий на урбанизированной территории и анализа воздействия транспорта на воздушный бассейн.

Экспертная система содержит следующие критерии, разбитые на блоки:

1. Геоинформационные данные: границы региона, районов и более мелких территориальных единиц; геоинформационные слои общего назначения: реки и водные пути, автомагистрали, железные дороги, урбанизированные территории; данные по численности населения; области природного значения; координаты мест размещения существующих и планируемых перерабатывающих предприятий; расстояния между рассматриваемыми точками.
2. Экологические критерии: коэффициенты образования отходов в результате применения различных технологий утилизации отходов, принимая во внимание различные типы отходов; токсичность загрязняющих веществ и классы опасности отходов.

3. Экономические критерии: интервальные оценки издержек переработки различных типов отходов различными технологиями; инвестиционные затраты строительства или реконструкции сортировочных станций, учитывающие мощность соответствующего оборудования; транспортные издержки; цены вторичных материалов и энергии, полученной, например, при сжигании отходов.
4. Специфическая информация, касающаяся отходов: типы рассматриваемых отходов; соответствующие технологии, используемые для переработки каждого типа отходов; структура потока отходов в различных районах рассматриваемого региона; информация по методам сбора и сортировки отходов;
5. Информация, относящаяся ко времени: временной горизонт модели (количество рассматриваемых периодов, продолжительность этих периодов); воздействия, влияние которых может изменяться во времени (например, газообразные выбросы от автотранспорта); фактор времени в экономических решениях (норма дисконтирования).

ПК «Мониторинг отходов» разрабатывался на основании данных по Алтайскому краю и на сегодняшний день содержит информацию об 700 несанкционированных свалках на территории края; 300 видов отходов, образующихся на 150 промышленных и сельскохозяйственных предприятиях, количестве образуемых отходов на территории края.

Облегчить решение проблем, связанных с выбором технологии переработки отходов, может информация об отходах, собираемая в банк данных (БД), который в дальнейшем будет использоваться при создании автоматизированных информационной системы.

ПК «Мониторинг отходов» состоит из основных разделов:

1. Главное меню (рис. 1) является основным окном, позволяющим получить доступ к ПК «Кедр-регион», ПК «GisMaster», к базе данных по отходам и технологиям. Здесь также предусмотрено «окно редактирования данных карты», позволяющее открывать, редактировать и сохранять файлы, содержащие данные, отображенные на картах. Этим решена проблема использования нескольких программных продуктов, поддерживающих формат DOS.
2. Меню «Отходы» (рис. 2) содержит два списка: отходы жизнедеятельности и соответствующие каждому отходу список технологий по переработке данного отхода. Меню позволяет добавлять или удалять как наименование отходов, так и технологий.
3. Меню «Технологии» (рис. 3) позволяет выбрать любое наименование технологии, уже имеющееся в базе данных и получить подробное описание оборудования, необходимого для данной технологии, краткое описание технологии, а также отдельные параметры, необходимые для дальнейшего эколого-экономического расчета и сравнения с другими технологиями: площадь помещения, занимаемая оборудованием; стоимость оборудования; мощность оборудования; количество человек, необходимого для обслуживания; производительность оборудования. Здесь же расположены кнопки запуска меню «добавить технологию», «расчет» и «сравнить технологии».
4. Меню «добавить технологию» (рис. 4) позволяет добавить новую технологию в базу данных. При этом необходимо ввести все данные, необходимые для описания технологии (см. меню «технологии»), а также присвоить имя файла, в котором будет храниться описание технологии.
5. Меню «Расчет» (рис. 5) запускает окно «Экономический и экологический анализ». Экономический анализ учитывает затраты на сбор и доставку отходов жизнедеятельности к предприятию-переработчику, капитальные затраты, затраты на переработку отходов. Результатами экономического анализа является определение суммарных затрат, срока окупаемости оборудования, рентабельности производства, чистой прибыли от реализации продукции. Для проведения экологического анализа необходимо дополнительно ввести сведения о количестве отходов каждого класса опасности. При этом, программа позволяет рассчитать как полный ущерб, нанесенный отходами производства и потребления окружающей природной среде, так и ущерб, нанесенный отходами определенного класса опасности.
6. Меню «Изменение констант» позволяет изменить постоянные величины, используемые в расчетах.
7. Меню «Сравнение технологий». В данном окне производится сравнительный анализ нескольких технологий по переработке каждого отхода с занесением результатов в базу данных.

По результатам экономического и экологического расчетов строятся три диаграммы:

- Экономическая эффективность;
- Срок окупаемости;
- Себестоимость;

Кроме того, здесь приведены числовые значения параметров наилучшей технологии как по экологичности, так и по экономичности.

Работа по созданию системы управления потоками отходов производства и потребления на основе описанной экспертной системы отмечена в 2006 г. Национальной премией им. В.И. Вернадского. На программный комплекс «Мониторинг отходов» получено свидетельство о государственной регистрации №2011614459.

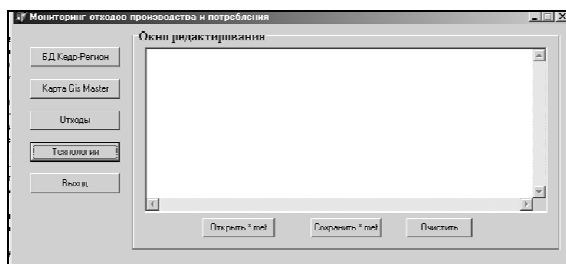


Рис. 1. Главное меню ПК «Мониторинг отходов».

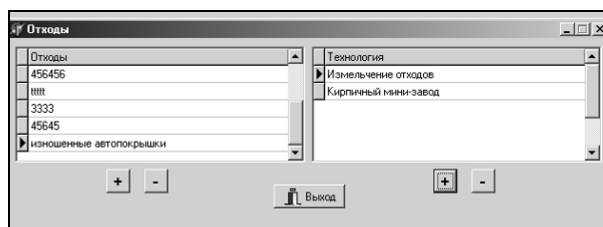


Рис. 2. Меню «Отходы».

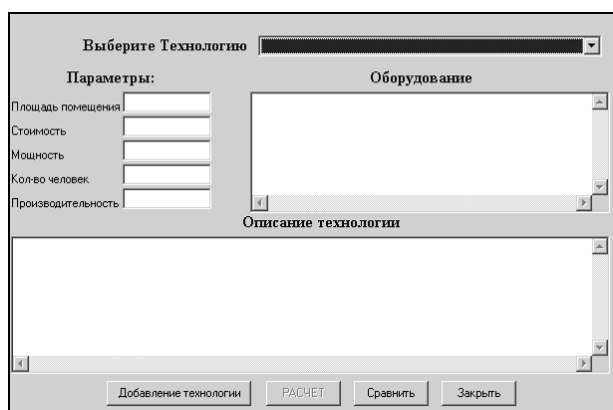


Рис. 3. Меню «Технологии».

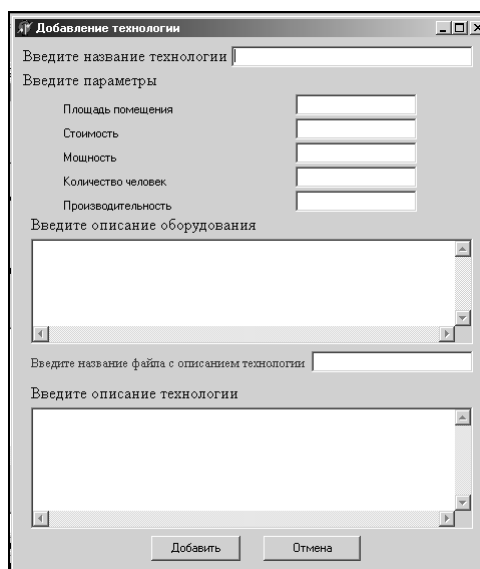


Рис. 4. Меню «Добавление технологии».

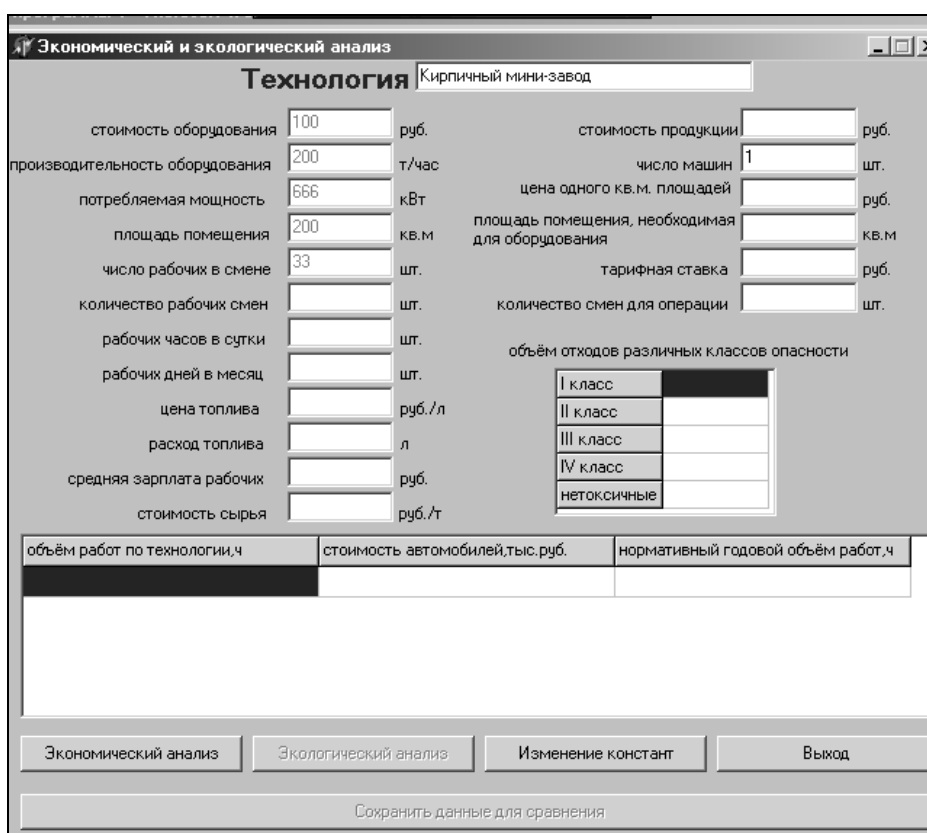


Рис. 5. Панель ввода исходных данных для экономического и экологического расчета.

В качестве исходной информации для гео-информационного блока служат данные о сортировочных пунктах и крупных промышленных предприятиях. Для решения проблемы требуется количественная

характеристика описанных выше объектов: потребности в вывозе отходов, а так же географические координаты предприятий и полигонов ТБО.

После сбора данных и нанесения на карту города, можно приступить к вычислению расположения заводов. Очевидно, что наилучшим местом расположения завода будет точка, совпадающая с географическим центром между поставщиками [4].

В этом случае протяженность путей будет иметь наименьшее значение, а транспортные расходы сведены к минимуму. Если по одной из причин (технической, архитектурной и др.) нельзя будет расположить завод в рассчитанном месте, то его необходимо сместить на минимально возможное расстояние. Приоритет будет иметь местность с наиболее развитым транспортным узлом.

Координаты условного центра перерабатывающего завода рассчитывается по следующим формулам:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n S_i}; \quad y = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

где x_i, y_i - значение координат x и y для i -ого предприятия; $\sum S_i$ - количественная оценка образования отходов i -ого предприятия (единицы веса в единицу времени).

На следующем этапе определяется оптимальный маршрут движения мусоровозов. Поставленная задача будет решаться в два этапа: 1) нахождение плана перевозок, при котором объем грузовых работ имел бы минимальное значение и 2) непосредственная прокладка этого пути с учетом городской застройки.

В качестве основы решения поставленной задачи взят метод потенциалов, являющийся детализацией метода последовательного улучшения плана применительно к транспортной задаче. Метод потенциалов позволяет, отправляясь от некоторого опорного плана перевозок, построить решение транспортной задачи за конечное число итераций (шагов) [3].

В разрабатываемой системе переработки отходов предполагается наличие нескольких заводов-переработчиков и множества сортировочных пунктов, принимающих различные виды отходов (стеклотара, пищевые, бумажные и бытовые) от населения [5]. Главным критерием расположения пунктов приема отходов является удобство для населения – человеку должно быть удобно сдавать отходы на переработку, а не выкидывать их на свалку. Это могут быть специальные места в спальных районах, места, через которые проходят жители на работу (около автобусных остановок) и т.д. Следует отметить, что для уменьшения нагрузки и количества оборудования, установленного на заводах-переработчиках, отходы будут распределяться согласно профилю предприятия. На текущий момент сбор осуществляется только собственными производственными силами, предприятия не помогают друг другу, добиваясь главной цели в конкурентной борьбе – охватить как можно больший сегмент рынка. Однако объединение предприятий в единую систему позволит сократить транспортные расходы.

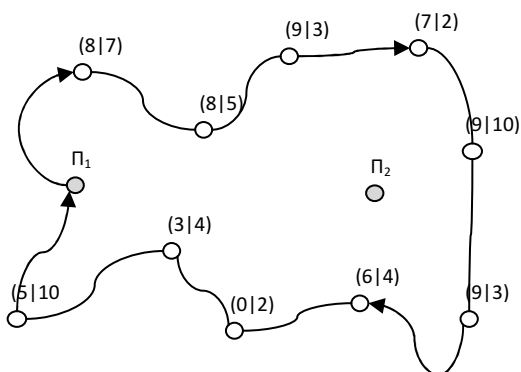


Рис. 6. P_1, P_2 – заводы-переработчики; (1|2) – сортировочные пункты, в скобках указано количество отходов в единицу времени, предназначенных для первого и второго завода соответственно.

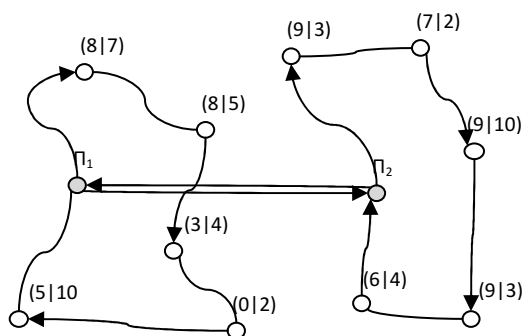


Рис. 7. Улучшенная схема перемещения автотранспорта при сборе отходов с сортировочных пунктов.

На рис. 6 схематически представлен план сбора отходов переработчиком P_1 , проходящий через все сортировочные пункты. Для облегчения понимания графика путь от P_2 , так же проходящий через все сортировочные пункты, не отмечен.

Очевидно, что наиболее приемлемой будет система, при которой каждый завод обслуживает только те пункты, которые географически ближе находятся к нему, оставляя неохваченные пункты другому

переработчику. Оптимальным будет считаться случай, при котором возможно планирование круговых маршрутов, при которых мусоровоз проезжает через несколько пунктов, прежде чем вернуться назад.

После этого отходы, предназначенные для второго завода, отдельным маршрутом доставляются на него с первого завода. Затем, этим же рейсом доставляются отходы со второго завода на первый, собранные для него с остальных сортировочных пунктов (рис. 7). Благодаря этому уменьшается путь, проходимый автотранспортом, частично сокращается время доставки отходов к переработчикам, а также сокращены расходы на горючее и амортизацию. Общая экономия, не считая заработной платы рабочим, может составить 30%. В масштабах города – это десятки миллионов рублей каждый год, только благодаря взвешенному подходу к месторасположению перерабатывающих пунктов.

Без учета мониторинга образования отходов вероятен случай, когда отправленные для сбора отходов мусоровозы могут оказаться полупустыми или наоборот, вынуждены делать несколько рейсов в один и тот же район города. Решение данной проблемы сводится к нахождению наименьшего пути посредством решения транспортной задачи, суть которой состоит в следующем.

Согласно опорному плану каждому пункту задачи составляется число, разность для пары пунктов A_i , B_j , связанных основной коммуникацией, была равна c_{ij} – стоимости перевозок между этими пунктами единицы продукта. Если разность предварительных потенциалов не будет превосходить c_{ij} , то данный план перевозок – решение задачи, а предварительные потенциалы – потенциалы задачи. В ином случае указывается способ получения нового опорного плана, связанного с меньшими транспортными издержками. Через конечное число итераций процесс решения завершится построением оптимального плана и системы потенциалов задачи.

Таким образом достигается снижение количества выездов к клиенту, снижаются затраты у клиента на вывоз, а у транспортировщика на сбор отходов.

Классическая транспортная задача не способна рассмотреть вариант, при котором отходы собираются со всех сортировочных пунктов, когда переработчики могут перерабатывать лишь определенные виды отходов.

В результате наших исследований будет создан программный продукт, который позволит практически мгновенно найти оптимальное расположение заводов для любого города при минимальных транспортных издержках.

Отличием данного программного продукта является его универсальность - благодаря интеграции с системой Яндекс.Карты появляется возможность применить его к любому городу (рис. 8). Диаметр окружности на рисунке пропорционален объему образующихся отходов, в у.е.

Приложение способно рассчитывать данные месторасположения завода-переработчика и определять оптимальный путь транспорта. В качестве среды для разработки выступает среда Delphi 7.0. Программа обладает следующими возможностями: расчет минимального расстояния; нахождение расположения завода - переработчика прямо на снимках со спутника; расчет оптимального пути.

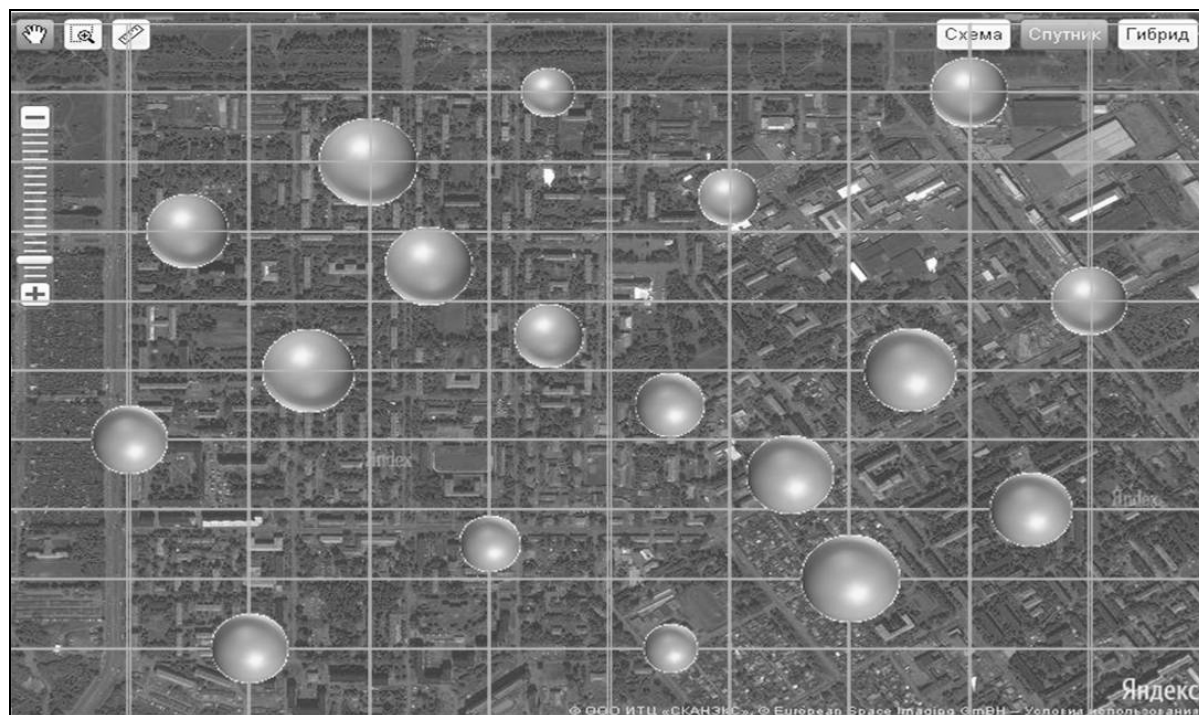


Рис. 8. На Яндекс-Карте обозначены возможные места расположения сортировочных пунктов в г. Барнаул.

Реализуя на практике данную идею, можно добиться оптимального расположения перерабатывающих заводов, обслуживающих всю территорию города.

Апробация разработанного математического аппарата проводилась на примере г. Барнаула. Анализ сложившейся ситуации показал, что наиболее рациональна будет функционировать система, состоящая из двух перерабатывающих заводов и множества сборочных пунктов приема отходов от населения. В данном случае огромную роль будет играть выбор месторасположения сортировочных станций на территории города.

С развитием сетевых технологий и Интернет многие программы, первоначально предназначенные исключительно для работы в автономном режиме, модифицируются для функционирования в локальных и глобальных сетях. Не является исключением и программное обеспечение в области геоинформатики. В качестве системообразующей для организации удаленного доступа к таким ресурсам многими учеными рассматривается WWW-технология. Данный подход позволяет создавать корпоративные ресурсы, используя не только возможности протоколов HTTP и FTP и их связки, но и подключать СУБД, их приложения, а также другие «внешние» программы, работающие с использованием CGI, ISAPI и др. При включении в состав клиентского обеспечения так называемых модулей Plug-in обеспечивается возможность прямого просмотра и работы с документами, выполненными в иных, нежели HTML, форматах (DOC, XLS, CGM и т. д.). Использование языков JAVA, Delphi, C++ позволяет создавать оригинальные интерфейсные и иные приложения, существенно разнообразившие способы работы с информацией в режиме удаленного доступа [1, 2].

Поэтому дальнейшие исследования нашего коллектива будут направлены на создание программного комплекса с возможностью работы через Интернет, что позволит работать с одной базой данных специалистам широкого круга – администраторам предприятий, экологам, специалистам природоохранных структур.

Литература

1. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. М. : Эдиториал УРСС, 2001. 304 с.
2. Батурин В.А. и др. Моделирование и оценка состояния медико-эколого-экономических систем. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. 249 с.
3. Михайлов А.В., Мельберг А.А., Егоров В.И. Мониторинг атмосферы с применением электронной картографической системы // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 5. С. 283-285.
4. Михайлов А.В. Региональная система управления сферой отходов // Твердые бытовые отходы. 2008. № 12. С. 56-61.
5. Михайлов А.В. Организация системы сбора и удаления отходов // Твердые бытовые отходы. 2009. № 12. С. 24-26.

Некоторые особенности работы с космическими снимками для оценки изменения территорий

С.А. Мустафин¹, А.А. Зейнуллина²

¹ Институт проблем информатики и управления МОН РК, Алматы, Казахстан

² Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Задачи, решаемые на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включают поиск объектов заданного типа на участках поверхности Земли, классификацию элементов земной поверхности с использованием яркостных, спектральных и пространственных признаков. При этом изменчивость и разнородность данных задач по изучаемым объектам и явлениям привело к необходимости создания узкоспециализированных систем, эксплуатация которых требует работы высококвалифицированных специалистов, которые интуитивно строят набор операций при решении конкретных задач.

Изображения, получаемые средствами ДЗЗ, используются как источники информации во многих задачах картографирования, навигации, управления, технической диагностики, геологоразведки, сельского хозяйства и т.д. На их основе может формироваться пространственная модель территории для решения широкого круга задач эффективного управления хозяйственными ресурсами, контроля за протекающими на ней техногенными и природными процессами. Модель целесообразно строить в рамках существующих баз данных территориальных геоинформационных систем (ГИС) с постепенным усложнением и расширением состава решаемых задач. При этом модель может быть рассмотрена иерархически - крупномасштабном, среднемасштабном, мелкомасштабном уровнях, и в двух вариантах изменения во времени: статическом и динамическом с некоторыми периодами обновления. Каждый этап расширяет круг решаемых задач и требует привлечения данных более качественного уровня. Для уточнения модели используют существующие картографические материалы, данные измерений координат с помощью глобальной навигационной системы.

Системы ДЗЗ различаются по сложности, кругу решаемых задач, степени автоматизации, условиям эксплуатации и техническим характеристикам.

Разработка датчиков и способов их доставки приводит к постоянному пересмотру принципов построения и функционирования систем и к разработке алгоритмов обработки и анализа изображений.

Во-первых, современные оптические системы с матричными полупроводниковыми датчиками экономичны, надежны и вместе с высококачественной оптикой могут обеспечить необходимое разрешение.

Во-вторых, повышение разрешающей способности требует увеличения производительности средств видеоизмерений, что приводит к выборочной съемке, ведению базы картографических данных, бортовой обработке данных с целью выявления точек ориентирования, координатной привязки получаемой информации, и должны подвергаться сжатию.

В-третьих, компенсация действия искажающих факторов, вызванных повышением разрешения и скоростью получения информации, является дополнительной нагрузкой на вычислительные комплексы.

Компьютерную обработку изображений принято проводить в два этапа. На первом этапе (предобработка) осуществляется решение задач выравнивания общего яркостного фона изображения, устранения на изображении шумов и помех различного рода (засветка отдельных участков изображения, разрывы объектов, трещины и т.д.), контрастирования, бинаризации и т.д. Операции предобработки изображений позволяют улучшить результат интерпретации изображений - выходное описание исходного информационного образа должно быть преобразовано для хранения, передачи и анализа этой информации. Основными задачами предобработки изображений в системах ДЗЗ являются радиометрическая коррекция, геометрические преобразования, представление данных, сжатие данных, улучшение изображений. Решения их используются для определенных целей, и результаты предобработки используются при анализе изображений. Окончательная обработка изображений проводится для конкретных прикладных задач.

Для оперативной наземной обработки поступающей информации требуется применение высокоэффективных специализированных вычислительных систем, налагающих в за частую трудновыполнимые ограничения на алгоритмы обработки. В силу этого анализ видеоданных ограничиваются задачей синтеза изображения, анализ и распознавание которого проводится человеком.

Одной из наиболее перспективных областей для использования видеоданных является сельское хозяйство. Сельскохозяйственные культуры хорошо проявляются на космических снимках - хорошо дешифрируются как по текстуре, так и по спектральным характеристикам. Применение методов ДЗЗ в задачах сельского хозяйства имеет давнюю историю и развивается в связи с появлением новых космических аппаратов, методик, методов и алгоритмов. Конечной целью автоматизированных систем такого вида является контроль состояния культур, прогнозирование урожайности и пр. Однако наш опыт решения этих задач незначителен, геоинформационные технологии в управлении используются слабо, хотя методы ДЗЗ широко используются в других странах мира [1].

Идея создания национальной космической системы ДЗЗ для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения Казахстана назрела давно. С момента образования Национальным космическим агентством Республики Казахстан ведется системная работа по реализации крупных проектов (в состав входит и мониторинг земель сельскохозяйственного назначения), большинство из которых включены в программу ФИИР:

- космическая система ДЗЗ, позволяющая с помощью специальных спутников получать различную информацию, которая будет использоваться во многих областях экономики;
- отечественная спутниковая система KazSat, которая позволит эффективно решить проблемы связи, вещания и мониторинга на всей территории республики;
- сборочно-испытательный комплекс космических аппаратов, целью которого является создание высокотехнологичного предприятия для проектирования, сборки и испытаний космических аппаратов;
- космический ракетный комплекс «Байтерек» на базе экологически безопасной ракеты-носителя «Ангара», благодаря которому Казахстан получит независимый доступ в космическое пространство.

Существующие разработки способствуют развитию отраслевого направления Национальной системы космического мониторинга РК.

Производство яровых зерновых культур в северном Казахстане основано на неполивном земледелии в степной и лесостепной зонах, где количество годовых осадков колеблется в пределах 250-400 мм. Свыше 11 млн. га посевов сосредоточены в пяти областях общей площадью около 1 млн. км². Основные выращиваемые культуры — яровые пшеница и ячмень, которые занимают свыше 90% всех посевных площадей. Типичный размер поля 200-400 га. Как правило, зерновые хозяйства имеют от 10 до 30 тыс. га посевов. Оптимальные даты сева — вторая половина мая, уборки — середина сентября. Недостаток увлажнения является базовым фактором, лимитирующим урожайность зерновых культур, которая варьируется в среднем по Казахстану от 0,6 до 1,4 метрических тонн с гектара [3].

Управление сельскохозяйственным производством требует наличия объективной и регулярно обновляемой информации. Для адресных инвестиций в агропромышленный комплекс необходимо проведение инвентаризации сельхозугодий. Традиционная система получения данных о состоянии сельскохозяйственных земель является недостаточной. Для учета, инвентаризации и классификации сельхозугодий необходимы специальные сельскохозяйственные планы и карты.

Инвентаризация сельскохозяйственных земель. Задачами, которые необходимо решить на данных ДЗЗ в аграрном секторе экономики, являются учет и контроль сельхозугодий, и создание специальных тематических карт. Сельхозугодия, брошенные, засоренные, зарастающие земли, хорошо дешифрируются по текстуре изображения. Наличие массива архивных снимков может оказать существенную помощь - можно выявить земли для возврата в оборот.

В настоящее время для инвентаризации сельскохозяйственных земель и создания специальных карт наиболее перспективными являются данные со спутника ALOS (Япония). Сенсор PRISM, которым снабжен спутник, в основном и предназначен для картографирования. Каждый объектив сенсора (вперед, вниз и назад) обеспечивает пространственное разрешение 2.5м. Для PRISM характерна не только высокая разрешающая способность, но и достаточно широкая полоса съемки до 35 км. Наиболее показательным параметром, выделяющим съемочную систему среди других, является высокая точность позиционирования снимков с использованием только орбитальных данных без наземных изысканий. Использование аппроксимации позволяет получать пространственную основу с точностью позиционирования не более 10 м, что удовлетворяет задачам сельскохозяйственного картографирования на среднемасштабном уровне. Оптическая система PRISM, основанная на трех зеркалах, не имеет хроматической аберрации по всему полю обзора и дает четкое изображение, что важно для дешифрирования и определения границ различных видов сельхозугодий и земель. Стоимость цифровых изображений с аппарата ALOS ниже, чем с других спутников с аналогичным разрешением, а себестоимость камеральных работ для создания картографической продукции незначительна от общей стоимости проекта [1].

Использование данных ДЗЗ для сельскохозяйственного картографирования традиционно обеспечивает составление карт административных районов, отдельных хозяйств, отдельных угодий.

Мониторинг состояния сельхозугодий на основе космических снимков - важная область применения технологии ДЗЗ в аграрной сфере.

Типичными задачами мониторинга состояния сельхозугодий являются:

- обеспечение текущего контроля состояний сельскохозяйственных культур;
- раннее прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур;
- одновременный мониторинг уборки урожая в крупных регионах и др.

Решение этих задач предоставляет пользователю возможность создания реальных границ полей, оценки их характеристик по данным ДЗЗ, проверки наличия сельхозкультур на заданном наборе полей, выявления расхождений.

Эти данные для задач обеспечиваются проведением систематических повторных съемок, удовлетворяющих требованиям периодичности и достаточного разрешения, которые обеспечивают наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожайности. Для этой цели используют при дешифрировании информацию об изменении спектральной яркости растительности в течение вегетационного периода, что определяется индексами вегетации. Они просты в вычислении, имеют широкий диапазон и хорошую избирательную чувствительность к изменениям в растительном покрове. Это дает возможность получать оценку состояния растений. Тон изображения полей позволяет судить о состоянии растений и принятия соответствующего состояниям решений [4].

Отметим, что текущие результаты мониторинга более ценны при совмещении с актуальными и достаточно точными картами сельхозугодий. Сами же задачи мониторинга решаются при этом эффективнее и с меньшими затратами, так как нет необходимости использовать результаты всех работ для определения границ полей и гораздо легче выделить эталонные участки. Для комплекса задач сельскохозяйственного мониторинга вполне подходят данные, полученные спектрометрией MODIS, который установлен на спутниках Terra и Aqua. Данные MODIS находятся в свободном доступе и распространяются в режиме реального времени. Основным интересом для мониторинга изменения оценки растительного покрова представляют измерения отраженного излучения в красном и ближнем инфракрасном спектральных каналах MODIS [1-4].

Данные ДЗЗ должны удовлетворять следующим условиям:

- возможность оперативного получения и обработки;
- высокое и сверхвысокое разрешение для повышения точности определения физических параметров растительного покрова;
- наличие мультиспектрального режима для использования при дешифрировании различий в спектральной яркости;
- достаточно частая периодичность получения.

Задача классификации спутниковых снимков и их фрагментов считается одной из основных задач обработки космических снимков и активно используется при мониторинге территорий. Наиболее распространенным подходом к ее решению является классификация пикселей изображения с помощью алгоритмов автоматической классификации, а затем дешифровка полученных результатов для выделения на изображении полей и принятие решения о произрастающих на поле культурах.

Основная постановка задачи автоматической классификации состоит в поиске подходящей классификации исследуемых объектов при заданных признаковых пространствах на классы эквивалентности (классы), причем эквивалентность объектов одного класса определяется каждым алгоритмом на принципах, на которых они построены. Правила объединения объектов в один класс индивидуальны для каждого алгоритма классификации. Параметризация алгоритмов позволяет в определенных пределах интерпретировать результаты конкретного метода классификации. В постановках задач распознавания существуют критерии оценки качества алгоритмов, в отличие от них, в алгоритмах автоматической классификации не существует универсальных оценок качества алгоритмов классификации [5]. Существуют методы классификации, где ищется экстремум некоторого функционала качества разбиения. Метод k-внутригрупповых средних находит группировку, где каждый объект находится ближе к среднему своей группировки, чем к среднему любой другой. Данные группировки объявляются классами. Классы в методах иерархической группировки определяются по последовательному объединению классов. В FOREL-алгоритмах классом объявляется совокупность объектов, принадлежащая некоторой окрестности – центр окрестности совпадает со средним принадлежащих ей объектов.

Таким образом, алгоритмы классификации являются общими, формальными, оторванными от предметной области, т.к. любой алгоритм разрабатывается для определенных структур данных и требует привлечения экспертов. Нами предложено в основу общего универсального подхода положить функционал, интерпретирующий внешнюю цель (индексы вегетации). Кроме того, опыт работы с алгоритмами построения классификаций показывает, что режим диалога, при котором результаты каждого цикла итерации представляются пользователю, чтобы он, выбирая параметры, мог управлять процессом классификации при работе с космическими снимками, ресурсоемком.

Поэтому возникла проблема разработки метода распознавания сельхозкультур для контроля полей на основе информации об изменении индексов растительности в течение вегетационного периода. Это вызвано тем, что данные характеристики связаны с природой конкретного объекта исследования и отражают степень изменения классификаций относительно вариации интерпретирующего функционала – индекса вегетации.

Оценка эффективности подхода определялась на совокупности реальных прикладных задач. Исследования показали достаточно высокую эффективность по сравнению с другими подходами оценки изменения классификаций территорий.

Литература

1. Абросимов А.В., Дворкин Б.А. Перспективы применения данных ДЗЗ из космоса для повышения эффективности сельского хозяйства в России // Геоматика. 2009. № 4. С. 45-49.
2. Султангазин У.М., Муратова Н.Р., Дорайсвами Р., Терехов А.Г. Оценка санитарного состояния сельскохозяйственных угодий с помощью ДДЗ // Сб. науч. ст. «Современные проблемы ДЗЗ из космоса». М.: Полиграф сервис, 2004. С. 286-290.
3. Султангазин У.М., Дробжев В.И., Жантаев Ж.И. и др. Состояние и перспективы развития космических исследований в Казахстане // Междунар. науч. конф. «Суверенный Казахстан: 15-летний путь развития космической деятельности». Алматы.: ИКИ, 2006. С. 3-11.
4. Зейнуллина А.А. Обработка космических снимков и анализ вегетационных индексов // Новости науки Казахстана. 2008. № 3. С. 113-122.
5. Журавлев Ю.И., Рудаков К.В., Дюкова Е.В., и др. Состояние и перспективы развития исследований в области обработки изображений // Информационные технологии. 1998. № 4.
6. Проект «Создание космической системы дистанционного зондирования Земли Республики Казахстан». http://www.gharysh.kz/article_20.html

Экспертная ГИС поддержки принятия решений в паводкоопасных ситуациях для территорий Сибирского региона

Л.Ф. Ноженкова, В.В. Ничепорчук

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Введение

Сибирский регион, обладая обширной территорией, расположенных в различных климатических зонах, развитой сетью водных объектов, большим количеством гидротехнических сооружений (ГТС), подвержен широкому спектру природных чрезвычайных ситуаций (ЧС). Наиболее характерными из них являются весенне-летние паводки, аварии на малых, вызывающих затопления территорий, объектов и инфраструктуры [1].

Большое количество населенных пунктов Сибири, объектов, транспортных коммуникаций находятся в долинах рек, поэтому опасность наводнений находится на высоком уровне. Ежегодный ущерб от затоплений территорий только для Красноярского края составляет более 50 млн. руб. Смягчить последствия стихии, предотвратить значительные ущербы может комплексный подход к проведению предупредительных и оперативных противопаводковых мероприятий.

Управление территориальной безопасностью должно быть обеспечено комплексной информационной поддержкой. В повседневном режиме функционирования это данные мониторинга гидрологической, метеорологической и ледовой обстановки и прогнозы характера прохождения паводков различной срочности, зонирования территории по степени риска ЧС, сценарии затоплений территории различной обеспеченности. На основании этой информации планируются превентивные мероприятия, определяется их приоритетность, объем и стоимость, проводится перегруппировка сил и средств, подготовка материальных, финансовых и других резервов [1]. В режиме ЧС формируются оперативные данные о динамике и последствиях затопления территорий, варианты минимизации потерь и ущербов.

Существующие в настоящее время автоматизированные информационные системы предназначены для решения отдельных задач управления. Это анализ данных мониторинга, сбор данных об инфраструктуре территорий, моделирование зон затопления. Например, комплекс программ, созданных в Датском метеорологическом институте, позволяет оценить последствия прорывов плотин дамб, параметры затопления и нанести на карты районы стихийного бедствия [3]. Однако они адаптированы для рек Европы с небольшими расходами воды в створах, интенсивным хозяйственным использованием и требуют большого количества исходных данных, что проблематично для малоизученных рек Сибири. Подобные системы разработаны и в Американском институте исследований окружающей среды (ESRI), как дополнительные модули к широко известной программе ArcGIS [4]. Широкую известность получила система CHECK-RAS моделирования затопления территорий, расчета высоты волны прорыва и зон затопления при авариях на гидротехнических сооружениях. Система выполняет также расчет масштабов эрозии почв, возникающей в следствии ливневых паводков, а также оценку рисков затоплений прибрежных территорий, вызванных ветровыми нагонами. Программа может быть использована в качестве расчетного модуля при формировании решений по ликвидации ЧС, однако требует специализированной подготовки в области гидрологии [5].

В России по заказу МЧС ряд организаций (Центр исследования экстремальных ситуаций, Академия им. В.Куйбышева и другие) разработали ряд программ, моделирующих ситуации, связанные с затоплениями территорий [6].

Фрагментарное решение задач поддержки принятия решений, отсутствие упорядоченных информационных ресурсов и достаточной методической базы снижает эффективность управления безопасностью.

Для эффективного предотвращения ЧС, связанных с затоплениями территорий, смягчения последствий наводнений необходимо дальнейшее развитие региональной системы мониторинга и прогнозирования, создание единого информационного пространства для межведомственного обмена данными мониторинга и прогноза обстановки [7]. Эти задачи определены нормативными документами [8, 9]. Перечислим основные из них:

- 1) формирование банков данных об источниках ЧС, создание специализированных геоинформационных систем, ведение и актуализация баз данных о ЧС.
- 2) сбор, обработка и анализ информации об источниках ЧС и показателях риска возникновения ЧС;
- 3) оценка последствий ЧС, формирование рекомендаций по управлению рисками ЧС и реализации комплекса мер, направленных на предупреждение ЧС и снижение негативных последствий при их возникновении;
- 4) разработка типовых сценариев возникновения и развития ЧС и оценка риска их возникновения.
- 5) Экспертная геоинформационная система "Паводки" может служить прототипом единой автоматизированной системы анализа данных комплексного мониторинга ЧС и оперативного контроля обстановки. В статье описан состав системы, принципы ее построения, примерах решения задач в различных режимах функционирования.

Использование информационных ресурсов для оценки опасностей и управления в ЧС

Информационная среда системы «Паводки» содержит разнообразные базы данных, пространственную информацию, банк сценариев ЧС, реализованный в виде базы знаний. Таблицы базы данных сгруппированы на 5 классов: справочники, источниками и реципиентам риска, сети и данным мониторинга обстановки, силам и средствам предупреждения и ликвидации ЧС (см. таблицу). Большинство объектов баз данных имеет картографическую привязку (координаты или единый идентификатор объекта). Это позволяет строить карты с произвольным набором тематических слоев и оперативным доступом к атрибутивной информации по каждому пространственному объекту.

Информация, представленная в базах данных, имеет различный регламент актуализации, установленный нормативными документами МЧС РФ. Данные по территориям и характеристики подразделений корректируются один раз в год перед наступлением весенних паводков, данные мониторинга обстановки – ежедневно, информация о ЧС заносится немедленно при поступлении. Всего в системе представлено более 100 таблиц, использующихся для решения функциональных задач в различных режимах функционирования.

Таблица. Основные таблицы базы данных системы «Паводки».

№	Наименование таблиц	Функциональные задачи, в которых используются информационные ресурсы
<i>Справочники</i>		
1	Территориальный справочник населенных пунктов (ОКАТО)	Территориальная привязка объектов и событий
2	Гидрологический справочник (водоемы и водотоки)	
3	Классификатор чрезвычайных ситуаций МЧС РФ	Формализация данных мониторинга для построения аналитических моделей
<i>Источники риска</i>		
1.1	Гидротехнические сооружения	Мониторинг состояния ГТС, оценка возможных последствий аварийных ситуаций, подготовка предложений по мероприятиям на объектах
1.2	Заторо- и зажооропасные участки	Оценка вероятностей ЧС при мониторинг движения кромки ледостава, формирование сценариев затопления территорий
1.3	Ледовые переправы	
<i>Характеристика территорий</i>		
2.1	Населенные пункты	Оценка последствий возможных ЧС (уязвимости территорий), формирование рекомендаций по действиям в условиях ЧС
2.2	Автомобильные дороги, мосты	
	Объекты жизнеобеспечения населения (водо- и теплоснабжения)	
<i>Мониторинг обстановки</i>		
3.1	Метеорологическая обстановка	Визуализация динамики изменения обстановки, отслеживание резких изменений контролируемых параметров
3.2	Гидрологическая обстановка	
3.3	Режимы работы ГЭС	
3.4	Мониторинг толщины льда	Оценка вероятности возникновения заторов при вскрытии рек и подвижек льда в зимний период
3.5	Архив наводнений и высоких уровней воды	Поиск прецедентов, года-аналога при долгосрочном прогнозировании ЧС на всех территории субъекта РФ
<i>Силы и средства предупреждения и ликвидации ЧС</i>		
4.1	Данные по аварийно-спасательным формированиям	Формирование рекомендаций по действиям в условиях ЧС, списков оповещения должностных лиц, оценка возможностей спасформирований
4.2	Телефонные справочники	
4.3	Планы эвакуации населения, животных, материальных ценностей	
4.4	Предупредительные мероприятия	Оценка степени защищенности территорий, приоритетности выполнения мероприятий, формирования рекомендаций по ликвидации последствий затопления территорий
4.5	Материально-технические и финансовые резервы	
4.6	Пункты временного размещения пострадавших	

Система использует также большое количество картографических ресурсов. Для отображения гидрологических процессов на территории субъектов используются карты М1 : 1 000 000. Карты двухкилометрового масштаба используются для моделирования обстановки в отдельном муниципальном районе либо на каком-либо участке реки. Цифровые планы населенных пунктов М1:10 000 служат для детальной оценки последствий возможных затоплений территорий и моделирования ЧС локального масштаба. В результате моделирования зон затопления населенных пунктов с соответствующим информационным наполнением возможно проведение оценок количества пострадавшего населения, прямого ущерба от повреждения инфраструктуры и косвенного ущерба от нарушения жизнедеятельности. Для моделирования зон затопления используются цифровые модели рельефа. Они представляют собой попиксельные матрицы поверхности с точностью 1-3 метра, разработанные на основе данных спутникового зондирования SRTM.

Используя комбинированные цифровые карты различных масштабов с цифровыми моделями рельефа можно смоделировать контуры зоны затопления, а в результате серии картографических запросов сформировать список объектов, попадающих в зону затопления. Новизна данной модели состоит в том, что помимо горизонтального поднятия уровня воды (заполнение водохранилищ), она учитывает прохождение волны паводка с учетом уклона реки. Это позволяет получать адекватную картину затопления для больших территорий при прохождении волны половодья, строить различные карты рисков ЧС, оперативной обстановки, использовать фрагменты карт для формирования отчетных документов.

Базы знаний экспертной системы описывают ситуацию в виде фреймов, представляющих собой набор слотов и процедур их обработки. В момент чрезвычайной ситуации она формирует необходимые решения по управлению в ЧС, обращаясь к другим модулям системы. Необходимая информация о месте ЧС и характеристиках формирований извлекается из баз данных, последствия ЧС моделируются в ГИС и с помощью расчетных методик, рекомендации по действиям в ЧС формируются на основе баз знаний. Недостающая информация может запрашиваться у пользователя, который инициирует процесс вывода. Вывод представляет собой эстафету присоединенных процедур, которые автоматически вызывают необходимые модули системы.

Разработан редактор баз знаний, позволяющий создавать модели ситуаций непосредственной из оболочки программы. Для актуализации и пополнения баз данных разработана технология распределенного сбора данных, импорта данных в хранилище в автоматическом и ручном режимах.

Работа системы в различных режимах функционирования показана на рис. 1.

Набор решаемых функциональных задач информационного обеспечения поддержки управления позволяет использовать экспертную ГИС «Паводки» при планировании и проведении большинства мероприятий обеспечения территориальной безопасности – от долгосрочных предупредительных, до оперативных, когда решения принимаются в условиях дефицита времени и ресурсов.



Рис. 1. Функциональные задачи, решаемые системой «Паводки» в различных режимах функционирования.

Примеры работы системы «Паводки»

Экспертная геоинформационная система «Паводки» применяется для автоматизации задач мониторинга паводковой обстановки и информационной поддержки управления в Главном управлении МЧС России по Красноярскому краю.

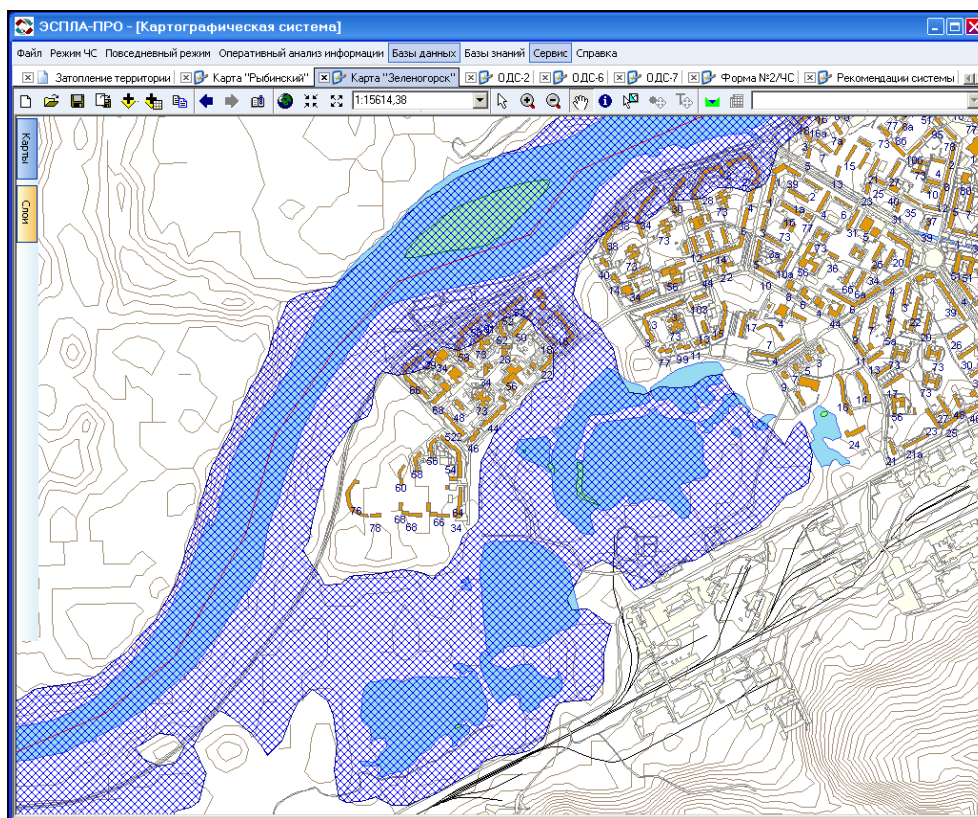


Рис. 2. Использование результатов моделирования для зонирования территорий по рискам ЧС.

Планирование долгосрочных превентивных противопаводковых мероприятий (отсыпка защитных дамб, ремонт плотин, берегоукрепительные и другие работы) основано на результатах полевых обследований территорий с повышенным риском и моделирования последствий затопления различной обеспеченности. На рис. 2 показаны результаты моделирования подъема уровня воды в реке Кан на 6 метров в районе города Зеленогорска. Такая ситуация может возникнуть при прохождении паводка 1% обеспеченности и в результате образования затора льда перед плотиной Красноярской ГРЭС-2. Поскольку при ЧС такого масштаба затопляется обширная территория в районе городских карьеров, городской совет принял решение о внесении корректировок в генеральный план перспективной застройки города.

Подобные работы проведены для сельских населенных пунктов центральных и южных районов края и на основе оценок ущербов аварий на ГТС и затоплений населенных пунктов сформированы рекомендации по проведению противопаводковых мероприятий для Министерства природных ресурсов и лесного комплекса Красноярского края [10].

Мониторинг оперативной обстановки

Данные комплексного мониторинга обстановки являются основой для прогнозирования ситуации и принятия превентивных мер по защите от ЧС. Сибирский регион имеет редкую, по сравнению с европейской частью РФ сеть метеостанций, гидрологических постов и других пунктов наблюдений. Поэтому, для получения достоверных оценок развития гидрологической обстановки важно использование всех доступных источников информации: донесений с мест, данных космического мониторинга, экспертных оценок, подготовленных на основе базы прецедентов и других материалов.

За период 2000-2011 гг. на территории Сибирского федерального округа зафиксировано более тысячи случаев затоплений территорий. Для паводков в Сибири характерен большой охват территории, когда при большой водности в бассейне крупной реки подтапливаются населенные пункты, как по ее берегам, так и на притоках. Другими словами, разлив одной реки (прохождение волн половодья) может сопровождаться затоплением 5-10 и более населенных пунктов. После постройки ГЭС это происходит, в основном, на незарегулированных реках (Иртыше, Лене, Вилюе, притоках Оби, Енисея, Ангары). В нижнем течении крупных рек часто затопления вызываются заторами льда, для предотвращения которых проводятся взрывные работы. Только на реках бассейна Енисея (включая Ангару) таких участков более 80. Неудовлетворительное состояние малых гидротехнических сооружений (ГТС), прежде всего плотин водохранилищ и защитных дамб, также приводит к различного рода авариям, связанным с образованием волны прорыва, затоплением объектов и инфраструктуры территорий в нижних бьефах ГТС.

Масштаб большинства наводнений не превышает муниципального, а ущерб составляет от 1 до 50 млн. рублей. Кроме затоплений населенных пунктов (жилых, производственных зданий, объектов

социально-бытового назначения) обычно затопляются и выходят из строя автодороги, мосты, ЛЭП и др., земли сельхозназначения (в том числе огороды, садовые участки) и лесного фонда.

Ежедневный сбор информации ведется по следующим направлениям: метеорологическая, гидрологическая, ледовая обстановка, ЧС на контроле, состояние сил и средств, запасы материально-технических ресурсов, проведенные и планируемые мероприятия. Поскольку данные поступают в разных форматах, разработаны модули ввода, автоматизирующие процесс пополнения баз данных. Например, метеоданные импортируются из сети Интернет, где ежедневно публикуются данные, собираемые 5300 метеостанциями мира. Из более чем 40 параметров обстановки для оценки гидрологической обстановки используются температуры воздуха (минимальная и максимальная на сутки), осадки, толщина снежного покрова, атмосферное давление и погода на час измерений.

Модуль анализа данных мониторинга позволяет представить основные тренды в виде различных графиков и диаграмм с возможностью сравнения данных за аналогичный период прошлых лет. На основе данных виды «дата – параметр – пространственная привязка» система строит динамические карты оперативной обстановки. Пользователь может выбирать произвольный период для анализа, настраивать вид аналитических форм, сохранять их для отчетов.

За период эксплуатации системы накоплен большой объем данных оперативного мониторинга обстановки. Кроме того, в систему интегрированы архивные данные на территорию Красноярского края (прецеденты затоплений населенных пунктов за 40 лет, максимальные уровни воды и метеоданные за 100 лет, работа ГЭС с 1995 года и т.д.). Это позволило провести детальный анализ рисков затоплений, построить Паводковый атлас края, сформировать рекомендации по проведению стратегических предупредительных мероприятий по снижению рисков затоплений.

Для более детального анализа выборки из больших наборов применяются средства оперативного анализа данных (OLAP) и ГИС. Построен ряд аналитических моделей на основе данных произошедших чрезвычайных ситуаций и происшествий, их предпосылок с учетом изменения гидрологической и метеорологической обстановки. Основу аналитических моделей событий составляет гиперкуб данных, где измерениями являются территория, время, тип события, а показателями – количество, ущерб, число пострадавших и другие показатели мониторинга обстановки.

Информационная поддержка управления в условиях ЧС

Основой оценки обстановки и динамики ЧС является моделирование процесса затопления территории. В ИВМ СО РАН разработаны алгоритмические и программные средства, позволяющие на основе цифровой модели рельефа строить зоны затопления. После расчета происходит визуализация зон затопления, с учетом уклона рек на больших территориях, моделируется поднятие уровня воды в сложных гидросистемах с несколькими водотоками. Метод апробирован на территориях с различными ландшафтными условиями.

На основе картографического анализа последствий ЧС система формирует перечень подтопленных объектов, и ряд документов, в том числе: текст оповещения населения; план по эвакуации людей и материальных ценностей; данные по силам и средствам; информация о транспортном, материально-техническом и других видах обеспечения.

Работа системы «Паводки» при поступлении сигнала о затоплении территории происходит следующим образом. Дежурный оперативной дежурной смены запускает режим ЧС, выбирает из списка населенный пункт, задает уровень воды. При необходимости система задает вопросы, уточняющие обстановку (характер паводка, тип водотока и др.). В соответствии с заданной моделью ситуации экспертная система выполняет следующие действия:

- запрашивает у пользователя тип ЧС и в зависимости от этого загружает необходимый модуль расчета масштабов аварии;
- производит расчет зон действия поражающих факторов ЧС, выводит отчет результаты моделирования;
- запрашивает у пользователя информацию о месте аварии;
- моделирует зону поражения, формирует тематическую карту и список объектов в зоне ЧС.

В результате работы системы формируется набор документов: текст оповещения населения, формы ЧС, оперативная карта зоны затопления с перечнем затопленных объектов, рекомендации по эвакуации населения, привлечению сил и средств и другая необходимая информация. Все расчеты занимают 2-5 минут, а объем формируемой информации равнозначен результатам работы оперативного штаба, состоящего из нескольких специалистов по направлениям.

Следует отметить, что от степени наполнения баз данных зависит полнота заполнения форм донесений. Например, практически всю информацию по силам и средствам, необходимую для заполнения формы З/ЧС «Состав привлекаемых сил и средств для ликвидации ЧС», можно заранее формализовать в виде иерархических таблиц ведомственной подчиненности, а планы привлечения формирований для ликвидации ЧС – в виде наиболее вероятных сценариев развития ситуации баз знаний системы.

Заклучение

Экспертная геоинформационная система "Паводки" является новым комплексным подходом автоматизации процессов принятия решений в паводкоопасных ситуациях. Как показал опыт эксплуатации, выбранная технология построения системы [11] позволяет оперативно увеличить функциональность и информационное наполнение системы. Использование системы позволяет не только сократить время формирования решений и документов, повысить эффективность работы оперативных подразделений МЧС России, но и способствуют повышению общего уровня квалификации специалистов, прозрачности информационных потоков, большей стандартизации всей системы управления.

Литература

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Региональные проблемы безопасности. Красноярский край. М.: «Знание», 2001. 500 с.
2. Обеспечение мероприятий и действий сил по ликвидации чрезвычайных ситуаций / С.К. Шойгу (ред.) // М., 1998. 170 с.
3. Mike3 – software Products // Danish Hydraulics. 1999. N 19.
4. Johnson R. A Case Study in Multiagency GIS for Managing a Large-Scale Natural Disaster // Global Risk Forum. Davos, Switzerland, 2008. P. 288-292.
5. Библиотека бесплатных программ Национального Агентства по чрезвычайным ситуациям США (FEMA). <http://www.fema.gov/library/viewRecord.do?id=2300>
6. Центр исследования экстремальных ситуаций. <http://www.esrc.ru/index.php?page=gis>
7. Ничепорчук В.В. Методические и программные средства поддержки принятия решений в паводкоопасных ситуациях. Автореф. Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2002. 20 с.
8. Постановление Правительства Красноярского края от 20.06.2007 г. N 241-п «О сети наблюдения и лабораторного контроля Красноярского края».
9. Приказ МЧС России от 4.03.2011 г. N94 «Об утверждении положения о функциональной подсистеме мониторинга, лабораторного контроля и прогнозирования чрезвычайных ситуаций единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».
10. Предпаводковое и послепаводковое обследование водохозяйственных систем и зон затопления в Шарыповском, Назаровском и Боготольском районах водотоков рек Обьюл, Березовка, Серез, Акатка, Улуй, Айдат и других, Красноярский край // Отчет о НИР. Красноярск: СНИИГиМ, 2011. 161 с.
11. Ноженкова Л.Ф., Исаев С.В., Ничепорчук В.В. и др. Средства построения систем поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации ЧС // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2008. № 4. 2008. С. 46-54.

Спектрально-текстурная сегментация спутниковых изображений высокого пространственного разрешения

И.А. Пестунов¹, С.А. Рылов²

¹ Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск

Введение

Сегментация является одним из важнейших этапов анализа цифровых изображений [1]. Она заключается в разбиении изображения на сегменты на основе подобия их спектральных и (или) пространственных (текстурных, контекстных) характеристик. Методы сегментации нашли широкое применение во многих прикладных областях, в том числе в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) [2,3].

В последние годы в области создания и развития средств и технологий ДЗЗ наблюдается стремительный прогресс. С каждым годом растет число запускаемых спутников, обеспечивающих поставку многоспектральных изображений высокого пространственного разрешения [4]. Особенность таких изображений состоит в том, что значительная часть информации о представленных на них объектах заключена в текстуре изображения, поэтому методы сегментации на основе лишь спектральных характеристик часто не обеспечивают возможность выделения интересующих пользователя объектов. Не являются исключением и методы, реализованные в известных пакетах программ обработки спутниковых изображений (ERDAS Imagine, ENVI, IDRISI и др.). В связи с этим разработка методов и программно-алгоритмических средств спектрально-текстурной сегментации изображений в настоящее время является актуальной проблемой [5].

В докладе предлагается метод спектрально-текстурной сегментации спутниковых изображений, основанный на разработанном ранее авторами вычислительно эффективном ансамблевом алгоритме кластеризации ECCA (Ensemble of Combined Clustering Algorithms) [6], и приводятся результаты его исследования на модельных и реальных спутниковых данных.

Сегментация изображения по спектральным признакам

Предлагаемый метод опирается на результаты сегментации исходного многоспектрального изображения, полученные с помощью ансамблевого алгоритма кластеризации ECCA, краткое описание которого приводится ниже.

Пусть $X = \{x_i = (x_i^1, \dots, x_i^d) \in R^d, i = \overline{1, N}\}$ – множество векторов спектральных яркостей, характеризующих d -спектральное изображение. Для общности полагаем, что векторы x_i лежат в прямоугольном гиперпараллелепипеде $\Omega = [l^1, r^1] \times \dots \times [l^d, r^d]$, где $l^j = \min_{x_i \in X} x_i^j$, $r^j = \max_{x_i \in X} x_i^j$. Под *сеточной структурой* будем понимать разбиение пространства спектральных признаков гиперплоскостями: $x^j = (r^j - l^j) \cdot i / m + l^j$, $i = 0, \dots, m$, m – число разграниченных участков по каждой размерности. Минимальным элементом этой структуры является *клетка* (замкнутый прямоугольный гиперпараллелепипед, ограниченный гиперплоскостями). Введем общую нумерацию клеток (последовательно от одного слоя клеток к другому).

Клетки B_i и B_j ($i \neq j$) являются *смежными*, если их пересечение не пусто. Множество смежных с B клеток обозначим через A_B . *Плотностью* D_B клетки B назовем отношение $D_B = N_B / V_B$, где N_B – количество элементов множества X , попавших в клетку B ; V_B – объем клетки B . Клетку B будем считать *непустой*, если $D_B \geq \tau$, где τ – величина заданного порога. Все точки множества X , попавшие в клетки с плотностью меньше τ , будем относить к “шуму”. Обозначим множество всех непустых клеток через \mathfrak{X} . Непустая клетка B_i *непосредственно связана* с непустой клеткой B_j ($B_i \rightarrow B_j$), если B_j – максимальная по номеру клетка, удовлетворяющая условиям: $B_j = \arg \max_{B_k \in A_{B_i}} D_{B_k}$ и $D_{B_j} \geq D_{B_i}$. Непустые клетки B_i и B_j *непосредственно связаны* ($B_i \rightleftharpoons B_j$), если $B_i \rightarrow B_j$ или $B_j \rightarrow B_i$. Непустые клетки B_i и B_j *связаны* ($B_i \sim B_j$), если существуют k_1, \dots, k_l такие, что $k_1 = i$, $k_l = j$ и для всех $p = 1, \dots, l-1$ выполнено $B_{k_p} \rightleftharpoons B_{k_{p+1}}$.

Введение отношения связности порождает естественное разбиение множества непустых клеток на компоненты связности $\{G_i, i = 1, \dots, S\}$. Под *компонентой связности* будем понимать максимальное множество попарно связанных клеток. *Представителем компоненты связности* G назовем клетку $Y(G)$, удовлетворяющую условию: $Y(G) = \arg \max_{B \in G} D_B$ (если несколько клеток удовлетворяют данному

условию, то $Y(G)$ выбирается из них случайным образом). Компоненты связности G' и G'' смежные, если существуют смежные клетки B' и B'' такие, что $B' \in G'$ и $B'' \in G''$. Смежные компоненты связности G_i и G_j связаны ($G_i \sim G_j$), если существует набор клеток (путь) $P_{ij} = \{Y_i = B_{k_1}, \dots, B_{k_l}, \dots, B_{k_l} = Y_j\}$ такой, что: 1) для всех $t = 1, \dots, l-1$ $B_{k_t} \in G_i \cup G_j$ и $B_{k_t}, B_{k_{t+1}}$ – смежные клетки; 2) $\min_{B_{k_t} \in P_{ij}} D_{B_{k_t}} / \min(D_{B_{k_t}}, D_{B_{k_{t+1}}}) > T$, $T > 0$ – порог объединения.

Кластером C назовем максимальное множество попарно связанных компонент связности, то есть 1) для любых компонент связности $G_i, G_j \in C$ выполнено $G_i \sim G_j$; 2) для любых $G_i \in C, G_j \notin C$ верно $G_i \not\sim G_j$.

С учетом сказанного, задача кластеризации заключается в разбиении множества \mathfrak{X} на совокупность кластеров $\{C_i, i = 1, \dots, M\}$ таких, что $\mathfrak{X} = \bigcup_{i=1}^M C_i$ и $C_i \cap C_j = \emptyset$ при $i \neq j$; число кластеров M заранее неизвестно.

Ниже представлен эффективный метод решения этой задачи, основанный на ансамблевом подходе.

Предлагаемый метод опирается на использование сеточного алгоритма $ССА$ [7], где m - число разбиений, T - порог объединения компонент связности, τ - порог “шума”). В работе этого алгоритма можно выделить три основных этапа.

1. Формирование клеточной структуры. На этом этапе для каждой точки $x_i \in X$ определяется содержащая ее клетка, вычисляются плотности D_B всех клеток и выявляются непустые клетки.
2. Выделение компонент связности G_1, \dots, G_S и поиск их представителей $Y(G_1), \dots, Y(G_S)$.
3. Формирование кластеров C_1, \dots, C_M в соответствии с указанным выше определением на основе выделенных компонент связности.

Алгоритм $ССА(m, T, \tau)$ является вычислительно эффективным в пространстве признаков небольшой размерности (≤ 6) [7], его сложность составляет $O(dN + dm^d)$, где N число классифицируемых объектов, d - размерность пространства признаков.

Однако $ССА$ относится к классу алгоритмов с фиксированной сеткой и поэтому результаты его работы существенно зависят от параметра m , который определяет масштаб элементов сеточной структуры. На практике эта неустойчивость результатов значительно затрудняет настройку параметров алгоритма.

Известно [8], что устойчивость решений в задачах кластеризации может быть повышена благодаря формированию ансамбля алгоритмов и построению на его основе коллективного решения. При этом используются результаты, полученные различными алгоритмами либо одним алгоритмом с различными значениями параметров, по разным подсистемам переменных и т.д. Ансамблевый подход является одним из наиболее перспективных направлений в кластерном анализе [9].

В описываемом алгоритме $ЕССА$ для формирования ансамбля используются результаты выполнения алгоритма $ССА(m, T, \tau)$ с различными значениями параметра m , а для формирования итогового коллективного решения – применяется метод, основанный на нахождении согласованной матрицы подобия (или различия) объектов [10]. Этот метод может быть описан следующим образом.

Пусть с помощью некоторого алгоритма кластеризации $\mu = \mu(\Theta)$, зависящего от случайного вектора параметров $\Theta \in \Theta$ (где Θ – некоторое допустимое множество параметров), получен набор частных решений $\mathbb{Q} = \{Q^{(1)}, \dots, Q^{(l)}, \dots, Q^{(L)}\}$, где $Q^{(l)}$ – l -й вариант кластеризации, содержащий $M^{(l)}$ кластеров.

Обозначим через $H(\Theta_l)$ бинарную матрицу $H(\Theta_l) = \{H_{i,j}(\Theta_l)\}$ размерности $N \times N$, которая для l -й группировки вводится следующим образом:

$$H_{i,j}(\Theta_l) = \begin{cases} 0, & \text{если объекты отнесены в один кластер,} \\ 1, & \text{иначе.} \end{cases}$$

После построения L частных решений можно сформировать согласованную матрицу различий $\mathbf{H} = \{\mathbf{H}_{i,j}\}$, $\mathbf{H}_{i,j} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L H_{i,j}(\Theta_l)$, где $i, j = 1, \dots, N$. Величина $\mathbf{H}_{i,j}$ равна частоте классификации x_i и x_j в разные группы в наборе группировок \mathbb{Q} . Близкое к нулю значение величины означает, что данные объекты имеют большой шанс попадания в одну и ту же группу. Близкое к единице значение этой величины говорит о том, что шанс оказаться в одной группе у объектов незначителен.

В нашем случае $\mu = ССА(m, T, \tau)$, где число разбиений $m \in \{m_{\min}, m_{\min} + 1, \dots, m_{\min} + L\}$, а объектами классификации будут являться представители компонент связности $Y(G_1), \dots, Y(G_S)$.

После вычисления согласованной матрицы различий, для нахождения коллективного решения применяется стандартный агломеративный метод построения дендрограммы, который в качестве входной информации использует попарные расстояния между объектами [11]. При этом расстояния между группами будем определять по принципу «средней связи», т.е. как среднее арифметическое попарных расстояний между объектами, входящими в группы. Процесс объединения продолжается до тех пор, пока расстояние между ближайшими группами не превысит заданное пороговое значение T_d , принадлежащее отрезку $[0,1]$. Этот метод позволяет выделять иерархическую структуру кластеров, которая упрощает процесс интерпретации результатов.

В соответствии с описанным выше методом разработан и программно реализован на языке Java ансамблевый алгоритм $ECCA(m_{\min}, L, T, \tau, T_d)$. Для работы алгоритма необходимо задать значения пяти параметров: $m_{\min}, L, T, \tau, T_d$. Многочисленные экспериментальные исследования, проведенные на модельных и реальных данных, показали, что при использовании 10 элементов ансамбля получаемые результаты являются устойчивыми к выбору параметра сетки m_{\min} . Параметр T оказывает слабое влияние на результат кластеризации. При обработке изображений параметр T выбирался равным 0.8, а порог “шума” $\tau \in \{0,1\}$. Алгоритм $ECCA$ позволяет получать иерархическую структуру данных. Проведенные исследования показывают, что параметр T_d , задающий глубину иерархии, достаточно выбирать из множества $\{0, 0.1, \dots, 0.9\}$.

С помощью алгоритма $ECCA$ производится сегментация изображения по спектральным признакам, результатами которой является картосхема изображения.

Сегментация картосхемы по текстурным признакам

Алгоритм кластеризации $ECCA$, описанный в предыдущем разделе, позволяет разбить изображение на области, однородные лишь по своим спектральным характеристикам, без какого-либо учета его текстурных свойств. Поэтому картосхема, полученная после первого этапа обработки спутникового изображения высокого пространственного разрешения, представляет собой раздробленную картину. На картосхеме, как правило, присутствует много спектральных классов, которым нет соответствия среди реальных (информационных) классов, представляющих пользовательский интерес.

Ниже описывается вычислительно эффективный метод, позволяющий устранить искусственную раздробленность выделяемых классов, на основе анализа текстурных характеристик картосхемы.

Пусть картосхема, полученная в результате применения алгоритма $ECCA$, состоит из $N_r \times N_c = N$ элементов разрешения. Разобьем ее на квадратные фрагменты размером $k \times k$ элементов. Для простоты положим, что значения параметров N_r и N_c кратны k . Каждому из таких фрагментов f_{ij} , $i = 1, \dots, N_r/k$; $j = 1, \dots, N_c/k$, сопоставим вектор $z_{ij} = (z_{ij}^1, \dots, z_{ij}^M) \in R^M$. Здесь $z_{ij}^l = N_{ij}^l/k^2$, где N_{ij}^l – число элементов фрагмента f_{ij} , относящихся к кластеру с номером l , $l = 1, \dots, M$.

Вектор z_{ij} содержит в себе информацию о пространственной организации элементов картосхемы в пределах фрагмента f_{ij} , т.е. текстурную информацию, которую будем использовать для сегментации картосхемы.

В качестве меры близости между двумя такими (нормированными) векторами $x = (x^1, \dots, x^M)$ и $y = (y^1, \dots, y^M) \in R^M$ примем метрику $\mu(x, y) = 1 - \sum_{i=1}^M \min(x^i, y^i)$, которую будем далее использовать в процедуре кластеризации фрагментов картосхемы по введенным текстурным признакам.

Предлагаемая процедура кластеризации выполняется в три этапа. На первом этапе осуществляется поиск центров кластеров с помощью известного алгоритма DINA [12]. На втором этапе полученные центры анализируются на предмет близости друг к другу. Если какие-либо два центра находятся на расстоянии меньше r (заданный радиус сферы), то они объединяются в один центр, соответствующий центру тяжести их внутренних точек. На третьем этапе осуществляется классификация векторов путем отнесения их к ближайшему центру, лежащему на расстоянии не превышающем r .

Классы, в которых число элементов меньше порога τ , задаваемого в процентах от общего числа элементов изображения, относятся к классу «шум», а фрагменты, попавшие в этот класс, классифицируются поточечно.

Предложенный метод реализован на языке Java в виде модуля $STSA$ с входными управляющими параметрами k, r, τ .

Результаты экспериментальных исследований

В данном разделе представлены результаты сегментации модельных и реальных изображений с использованием модулей *ECCA* и *STSA*, подтверждающие вычислительную эффективность предложенного метода. Обработка проводилась на ПЭВМ с тактовой частотой 3 ГГц.

Во всех экспериментах при работе алгоритма *ECCA* использовался ансамбль из восьми элементов, а для модуля *STSA* значения параметров r и τ полагались равными 0.4 и 1 соответственно.

На рис. 1 представлены результаты сегментации цветного изображения размером 640×480 пикселей. При работе модуля *STSA* параметр $k = 10$. Время обработки 0.24 с.



Рис. 1. Эксперимент 1. Исходное RGB-изображение (слева) и результат сегментации (справа).

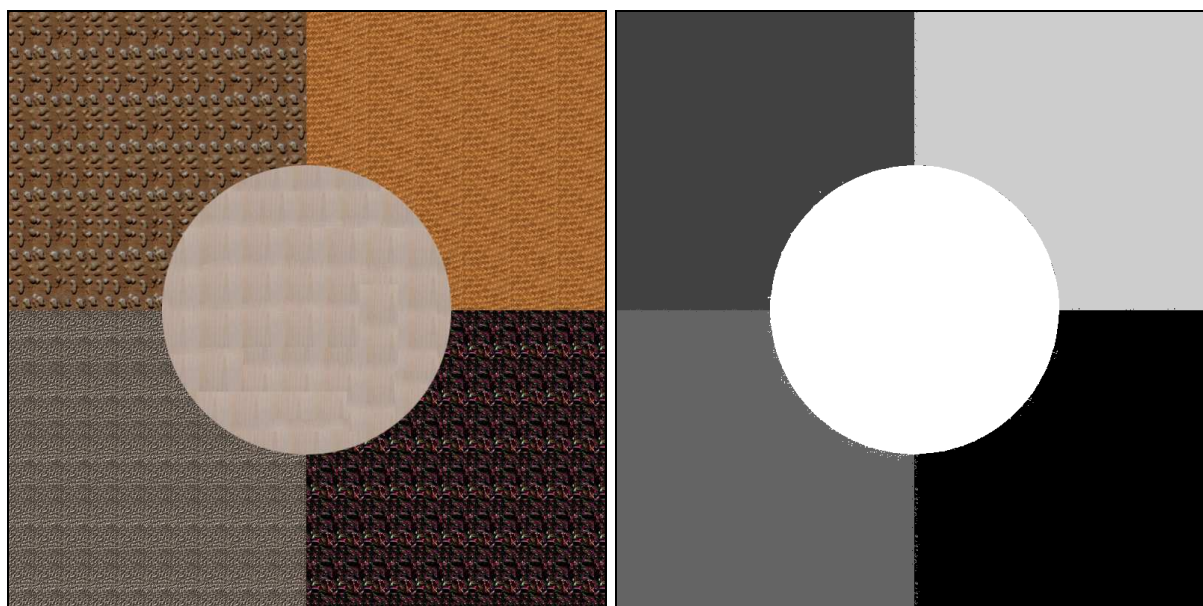


Рис. 2. Эксперимент 2. Исходное RGB-изображение (слева) и результат сегментации (справа).

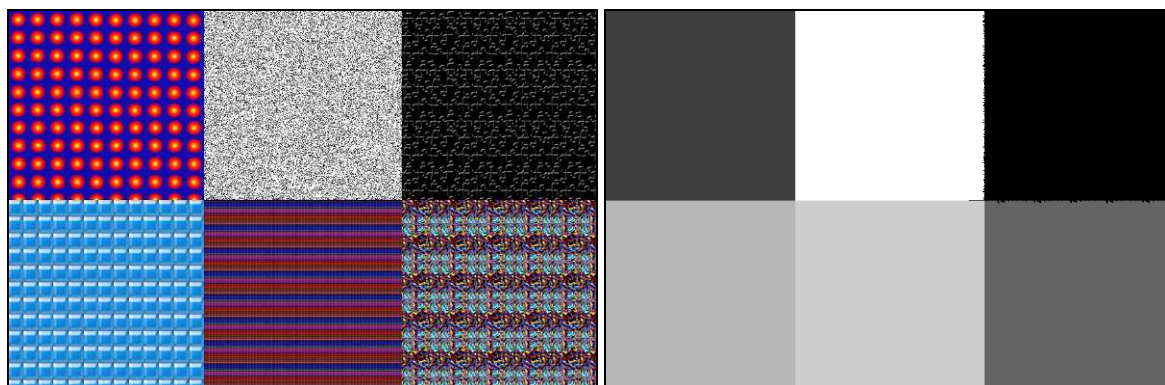


Рис. 3. Эксперимент 3. Исходное RGB-изображение (слева) и результат сегментации (справа).

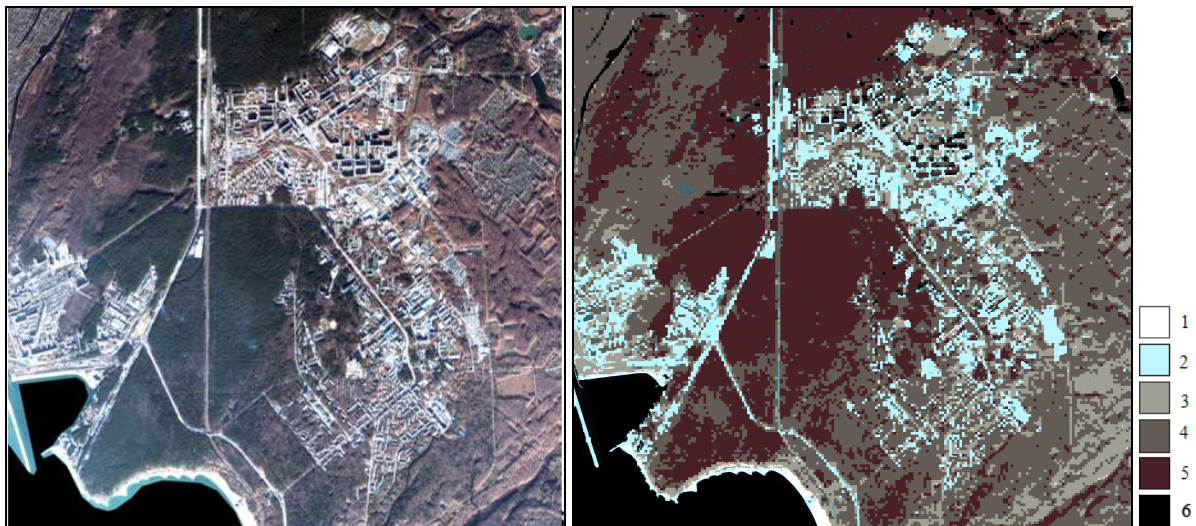


Рис. 4. Эксперимент 4. Слева - фрагмент изображения QuickBird (RGB: 4, 3, 2); справа – результат сегментации. Выделено 6 кластеров: 1 – песок; 2 – здания, сооружения, дороги; 3 – травянистая растительность; 4 – лиственные насаждения; 5 – сосновые насаждения; 6 – вода.

На рис. 2 и 3 представлены примеры сегментации двух цвето-текстурных модельных изображений размером 880×880 и 858×572 пикселей соответственно. Картограммы, полученные в ходе выполнения алгоритма *ЕССА*, разбивались на фрагменты размером 22×22 пикселей для первого и 26×26 пикселей для второго изображений. Время обработки 0.43 и 0.49 с соответственно.

В эксперименте 4 использовался фрагмент спутникового снимка Новосибирского Академгородка (размером 2701×2458 пикселей), полученного со спутника QuickBird 22 октября 2008 г. Исходный фрагмент представлен на рис. 4 (слева). Для обработки использовались три спектральных канала (2, 3, 4). Картограмма, полученная в результате применения *ЕССА*, разбивалась на фрагменты размером 12×12 пикселей. Время обработки 3.16 с. Результаты сегментации представлены на рис. 4 (справа).

Заключение

В докладе предложен вычислительно эффективный алгоритм сегментации многоспектральных изображений, учитывающий как спектральные, так и текстурные его характеристики. Результаты многочисленных экспериментов на модельных и реальных изображениях подтверждают высокое качество получаемых решений и их устойчивость к изменению настраиваемых параметров.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М: Техносфера, 2006. 812 с.
2. Dey V., Zhang Y., Zhong M. A review on image segmentation techniques with remote sensing perspective // ISPRS TC VII Symposium - 100 Years ISPRS. Vienna, Austria, July 5-7 2010. IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7A. P. 31-42.
3. Rekić A., Zribi M., Hamida A., Benjelloun M. Review of satellite image segmentation for an optimal fusion system based on the edge and region approaches // IJCSNS Intern. J. Comp. Sci. and Network 242 Security. 2007. Vol. 7, N 10. P. 242-250.
4. Болсуновский М.Л., Дворкин Б.А. Развитие систем ДЗЗ и информационно-аналитического обеспечения данными космической съемки: ближайшие перспективы // Геоинформатика. 2010. № 4. С. 11-17.
5. Pea D.E., Whelan P.F. Image segmentation based on the integration of colour-texture descriptors - A review // Pattern Recognition. 2011. doi:10.1016/j.patcog.2011.03.005.
6. Пестунов И.А., Бериков В.Б., Куликова Е.А., Рылов С.А. Ансамблевый алгоритм кластеризации больших массивов данных // Автометрия. 2011. Т. 47, № 3. С. 49-58.
7. Куликова Е.А., Пестунов И.А., Синявский Ю.Н. Nonparametric clustering algorithm for large datasets // Тр. 14 конф. «Математические методы и распознавание образов». М.: MAKS Press, 2009. С. 149-152.
8. Strehl A., Ghosh J. Clustering ensembles - a knowledge reuse framework for combining multiple partitions // J. Mach. Learn. Research. 2002. Vol. 38. P. 583-617.
9. Jain A.K. Data clustering: 50 years beyond K-means // Patt. Recogn. Lett.. 2010. Vol. 31, Is. 8. P. 651-666.
10. Berikov V.B. Construction of the ensemble of logical models in cluster analysis // Lect. Notes in Art. Intell. 2009. LNAI 5755. P. 581-590.
11. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 559 с.
12. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. С. 45.

Интернет-сервис для построения интерферометрических моделей на основе данных ALOS L1.0

В.П. Потапов, С.Е. Попов, А.В.Семенов

Институт вычислительных технологий СО РАН (кемеровский филиал), Кемерово

Актуальность

В последние годы все активнее для изучения природной среды применяются радиолокационные системы с синтезируемой апертурой, главным достоинством которых является возможность получения изображений независимо от состояния атмосферы и условий естественной освещенности местности.

Радиолокационные интерферограммы – высокоэффективный инструмент контроля окружающей среды. Они позволяют регулярно и с высокой точностью отслеживать изменения в рельефе на обширной территории земной поверхности. К задачам, решаемым с помощью радиолокационной интерферометрии, так же относятся:

- Изучение и оценка подвижек земной поверхности;
- Контроль использования природных ресурсов;
- Определение породного состава, мониторинг вырубок и состояния лесов;
- Наблюдения за природными бедствиями;
- Проведение научных исследований в различных областях.

Для решения задач угледобывающей отрасли, таких как: высокоточный учет объемов добычи в разрезах открытого типа, а так же, обнаружение, и наблюдение просадок грунтов в районах угледобычи, в нашей стране только начинают использовать методы радиолокационной интерферометрии. Тогда как во многих странах мира (США, страны Евросоюза, Австралия) мониторинг поверхности с использованием этих методов широко применяется уже последнее десятилетие. Преимуществами данного вида мониторинга являются:

- Возможность построения высокоточных (до 1 см и точнее, в зависимости от данных) высотных моделей рельефа земной поверхности;
- Всепогодность, из-за высокой устойчивости радарного сигнала к атмосферным явлениям;
- Регулярность, благодаря размещению радарных сенсоров на космических аппаратах;
- Сравнительная простота получения качественной модели рельефа и минимальные трудозатраты при обработке;
- Относительно малая стоимость за квадратный километр.

Большинство коммерческих продуктов, такие как ERDAS Imagime, Geomatica, ENVI работают с фокусированными радарными данными (L 1.1). Они позволяют, манипулируя значениями растровых данных и их географической позицией, обнаружить особенности местности, определять географические координаты этих объектов, извлекать линейные объекты, разрабатывать пространственные модели обработки данных (spatial modeler), переводить данных из одного формата в другой (import/export), ортотрансформировать, составлять мозаики из изображений, получать стереоизображения и автоматически извлекать географические данные.

Несмотря на богатые функциональные возможности, у коммерческих продуктов в области ДДЗ есть один большой минус - их стоимость. В "топовых" версиях она может достигать до 100 тыс. \$. Более того, все они не позволяют работать с нефокусированными данными уровня 1.0 (L 1.0). А учитывая стоимость одного L 1.1 снимка, нижняя граница цен начинается с 200 тыс. руб., ситуация для научно-исследовательских учреждений в России становится крайне сложной. С другой стороны, необработанные (сырые) данные дистанционного зондирования уровня 1.0 (L 1.0) стоят на порядок дешевле. К примеру, японская служба космических данных CROSS-EX (Internet data service system dedicated to ALOS) предлагает диапазон цен за стереопару не более 40 тыс. рублей. К тому же, создано огромное количество свободно распространяемого ПО, позволяющих вести обработку данных L 1.0 (ROI_PAC, GMTSAR, библиотеки GMT, GDAL и т.п.). Но у таких продуктов также есть свои минусы. Во-первых, компиляции и установка их в UNIX-системы, является нетривиальным процессом, за счет подключения дополнительных библиотек и сборок. А, во-вторых, ввод данных на обработку осуществляется в режиме консоли, и содержит порой огромное количество параметров, конфигураций и схем, что крайне неудобно для современного пользователя, который может оказаться и не специалистом в области программирования и администрирования в UNIX-системах.

Поэтому, разработка интуитивно понятного интерфейса для пре- и пост-процессорной обработки RAW-данных радиолокационной интерферометрии, основанной на принципах WYSIWIG, инкапсулирующего от конечного пользователя сложное взаимодействие программных функционалов, позволяющих непосредственно сосредоточиться на научной проблеме, является, по мнению авторов, весьма актуальной задачей.

1. Математическая модель процесса интерферометрической обработки

Стандартный процесс интерферометрической обработки, положенный в основу и реализованный в рассмотренном интернет-сервисе, состоит из следующих основных этапов (рис. 1).

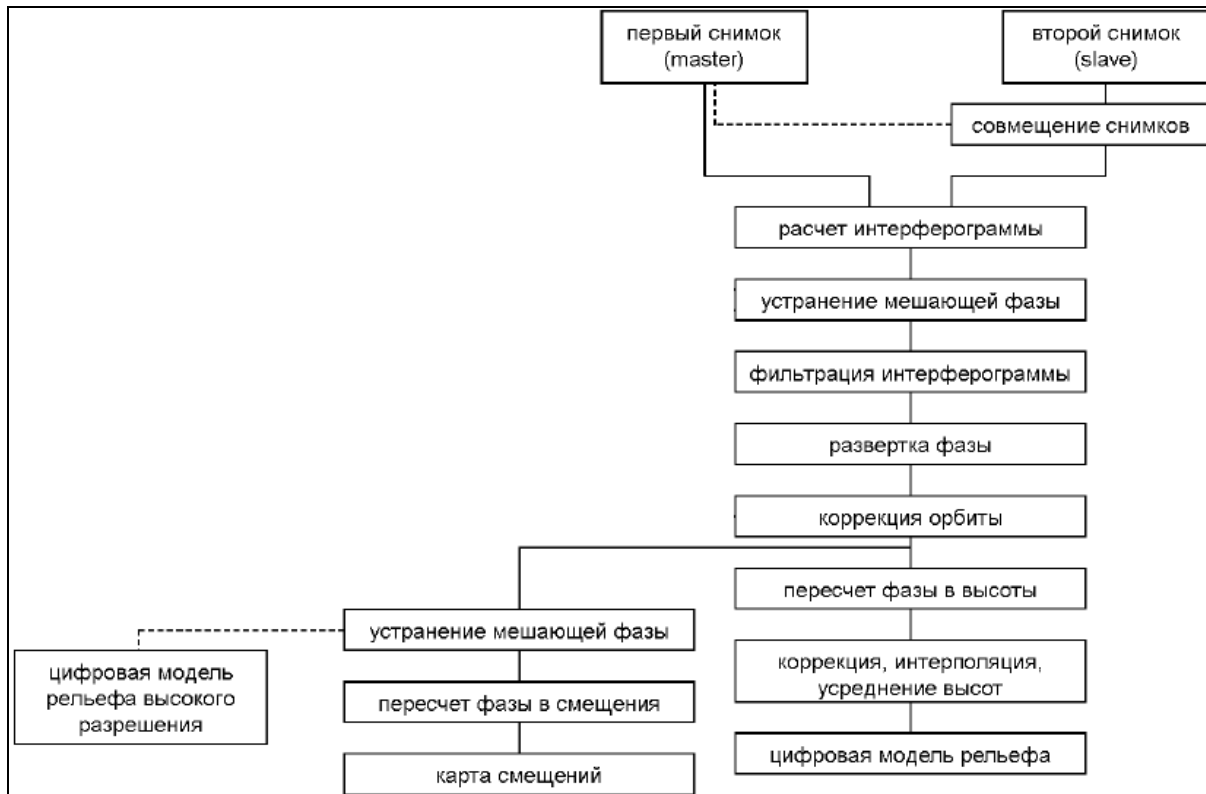


Рис. 1. Этапы интерферометрической обработки.

Фаза интерферограммы складывается из нескольких составляющих:

$$\Phi = \Phi_{topo} + \Phi_{def} + \Phi_{atm} + \Phi_n, \quad (1)$$

где Φ_{topo} – фазовый набег за счет обзора топографии под двумя разными углами; Φ_{def} – фазовый набег за счет смещения поверхности в период между съемками; Φ_{atm} – фазовый набег за счет различия длин оптических путей из-за преломления в среде распространения сигнала; Φ_n – вариации фазы в результате электромагнитного шума [1-2]. Последние две составляющие не несут информации о топографии поверхности, поэтому с помощью коррекции и фильтрации исключаются.

$$\Phi_{topo} = \frac{2\pi B_{\perp}}{\lambda r \sin \Theta} z + \Phi_{flat_earth}, \quad (2)$$

где B_{\perp} – перпендикулярная составляющая базовой линии, соединяющей положения космического аппарата при повторной съемке, конкретной точки земной поверхности; Θ – угол обзора поверхности при первом пролете; λ – длина волны сканирующего излучения; r – расстояние между антенной и точкой на поверхности; z – высота поверхности над опорным эллипсоидом; Φ_{flat_earth} – предопределенная фаза, рассчитанная из модели опорного эллипсоида.

Устранение мешающей составляющей Φ_{flat_earth} необходимо для уменьшения высокочастотных переходов фазы, возникающих на интерферограмме вследствие разницы расстояния проходимого сигналом при съемке с разных положений, а также переходов, вносимых рельефом поверхности. Информацией для расчета Φ_{flat_earth} может служить цифровая модель рельефа низкого разрешения, в качестве которой можно использовать генерируемые комплексом GMTSAR топографические поверхности или векторизованные топографические карты масштабов 1 : 100 000, 1 : 200 000. Оцифровка изолиний и отметок высот на топографических картах и дальнейшая интерполяция с целью получения однородной сетки – достаточно трудоемкий процесс, что увеличивает время построения цифровых моделей рельефа, что еще раз говорит в пользу создания интернет-сервисов, использующих распределение вычислительной составляющей, используя облачные вычисления. В ходе интерферометрической обработки данных разных спутников установлено, что наилучшим вариантом опорного рельефа является поверхность с постоянной высотой LDB типа ASTER1, глобального с 30 метровым разрешением. В этом случае не возникает необоснованных резких всплесков фазы, а

остаточные неопределенности, вызванные диапазоном регистрации фазы отраженного сигнала радаром от 0 до 2π , устраняются на этапе развертки фазы [2].

Величина смещения земной поверхности Δr произошедшего за время между повторными съемками отражается в фазовой составляющей Φ_{def} .

$$\Phi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r. \quad (3)$$

Из уравнений (1)-(3) следует, что интерферометрическая фаза Φ содержит информацию как о рельефе, так и о смещении, при этом Φ_{topo} проявляется тем больше, чем больше значение B_{\perp} , т. е. чем дальше находится спутник при своем повторном пролете от первого положения. Расчет цифровых моделей рельефа на основе данных PALSAR показал, что успешное восстановление рельефа возможно при длине перпендикулярной составляющей базовой линии более 3 000 м. Тогда как построение карты смещений необходимо выполнять при условии, что B_{\perp} , не превышает 1 000 м, в этом случае разница в углах обзора поверхности незначительна, сигнал при первом и повторном пролете проходит по близким путям и за счет этого дополнительно возрастает пространственная корреляция сигналов [2].

Когерентность Coh является величиной применимости пары радарных снимков для интерферометрической обработки и уменьшается в виду пространственной и временной декорреляции и шума вносимого в сигнал при распространении и отражении:

$$Coh = \frac{S_1 S_2^*}{\sqrt{S_1 S_1^* \cdot S_2 S_2^*}}, \quad (4)$$

где S_1 и S_2 – комплексные значения отраженного сигнала для первого (master) и второго (slave) снимков.

Значение когерентности, близкое к единице, свидетельствует о стабильности интерферометрической фазы, тогда как низкая величина – о разрушении фазы регистрируемых сигналов [2].

Фокусировка. Отдельно стоит отметить процесс фокусировки радарных изображений полученных сенсорами с синтезированной апертурой. Ведь возможность фокусировки, является одним из главных преимуществ пакета GMTSAR по сравнению с коммерческими продуктами. Процесс фокусировки требует значительных вычислительных ресурсов, но его алгоритм сам по себе довольно прост.

При фокусировании SAR-изображения (изображения полученного радаром с синтезированной апертурой), сначала производится последовательное суммирование упорядоченных по расстоянию сигналов вдоль следования сенсора синтетической апертуры (рис. 2).

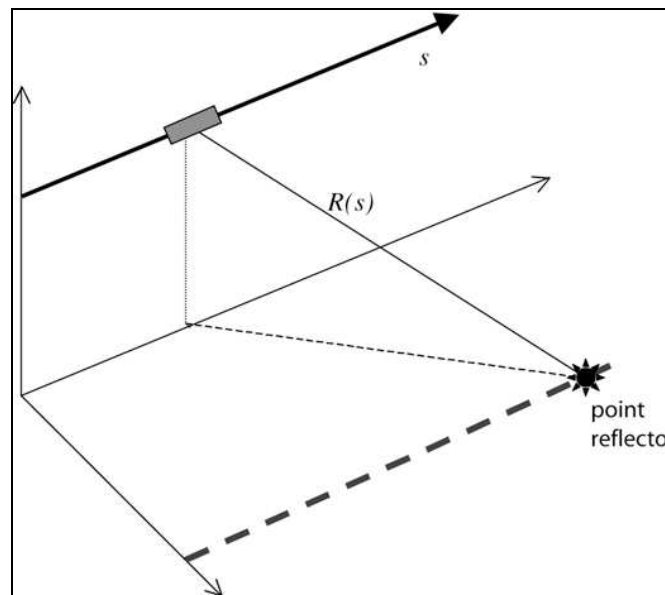


Рис. 2. Геометрия SAR-антенны, пролетающей над точкой-отражателем расположенной на земной поверхности. Расстояние R зависит от интервала времени s измеряемого по точным координатам орбиты в координатной системе, привязанной к Земле.

Следовательно, расстояние R вычисляется как функция от времени S :

$$R(S) = R_0 + \dot{R}_0 (S - s_0) + \frac{\ddot{R}_0}{2} (S - s_0)^2 + \dots, \quad (5)$$

где R_0 является максимальным расстоянием сближения космического аппарата и точки отражателя, а s_0 временем максимального сближения. Параметры R_0 , \dot{R}_0 , и \ddot{R}_0 необходимы для фокусировки изображения. В терминах SAR-обработки они называются ближними R_0 . Доплеровский центроид f_{DC} и Доплеровская частота f_R , связаны с коэффициентами этого многочлена:

$$f_{DC} = \frac{-2\dot{R}}{\lambda}, \quad f_R = \frac{-2\ddot{R}}{\lambda}, \quad (6)$$

где λ - длина волны радара. Если SAR-изображение фокусируется с нулевым Доплером, то диапазон скорости в точке s_0 будет определен нулевым.

Далее производится сопоставление каждой точки на поверхности земли (широта/долгота, топография) к координатам расстояние/азимут радара.

Если радиолокационное изображение фокусировалось на Доплеровский центроид отличный от нуля, то уравнение (6) может использоваться для расчета ненулевого диапазона при этом Доплере.

$$\dot{R} = -\frac{\lambda f_{DC}}{2}. \quad (7)$$

Затем, необходимо отметить, что производная параболической аппроксимации может определить сдвиг по времени вдоль трека, который создается при фокусировке с ненулевым Доплером. Это дает нам:

$$\Delta s = -\frac{\lambda f_{DC}}{2\ddot{R}}. \quad (8)$$

Соответствующая поправка диапазона задается:

$$\Delta R = \frac{\ddot{R}}{2} \Delta s^2. \quad (9)$$

Эти две поправки необходимы для перехода от географических координат к радарным координатам, в тех случаях, когда изображение сфокусировано с Доплером отличным от нуля.

В результате этих преобразований создается комплексный SLC файл, содержащий значения фазы, магнитуды и координатные привязки в системах расстояние/азимут и широта/долгота.

2. Программный функционал веб-сервиса ALOS L1.0 processor

Интернет-сервис представляет собой распределенное решение, построенное на базе технологий ASP.NET и PHP. Отличительной чертой которого является распределение не только клиент-серверной части, но и сервер-уровня. Функционал сервера программно разделен на две составляющие (далее модуль «ALOS Processor» и модуль «SAR Calc»): веб-логика и расчетная логика. Первая реализована на базе .NET Framework 4.0, развернута на веб-сервере IIS 7.0, вторая построена на базе PHP, с применением csh-интерпретатора, развернута на веб-сервере Apache с применением службы FTP (ОС Ubuntu Server 10.04).

В качестве расчетного ядра был выбран opensource пакет GMTSAR, который построен на основе библиотек GMT и NetCDF, отличительной особенностью обработки является наличие возможности «rprocess» – фокусировка радарных данных ALOS уровня L 1.0. GMTSAR содержит набор csh-скриптов, которые составляют исполняемую среду обработки переданных на вход, как пары SAR-снимков, так и пакетных картриджей из трех и более файлов, синхронизированных по времени, в порядке возрастания временных отметок. Принципиальная схема двухшаговой обработки радарных снимков и описание csh-скриптов GMTSAR представлены на рис. 3 и в табл. 1 [3], соответственно.

Каждый из перечисленных в таблице csh-скриптов принимает на входе определенное количество параметров, например, как видно из рисунка 3, скрипт *pre_proc.sch* оперирует с двумя файлами формата CEOS (ALOS L1.0 *.0_A), скрипт *dem2topo* работает с предварительно сгенерированным файлом топографии (*dem.grd*). Скриптам *intf.csh* и *filter.csh* необходимо указывать названия Гаусс-фильтров и т. д. Логика работы всех скриптов позволяет создать единый конфигурационный файл и сделать единую точку запуска, передавая только начальные параметры и сам конфигурационный файл. Для этого в пакете GMTSAR предусмотрен исполняемый скрипт *process2pass.csh*.

Модуль «SAR Calc» состоит из PHP-скриптов, формирующих файл конфигурации на основе переданных клиентом параметров, и запускающих на исполнение csh-скрипты GMTSAR. Целесообразно будет для каждого пользователя интернет-сервиса создавать копию рабочей папки GMTSAR, с размещением ее в домашнем каталоге, запуск csh-скриптов производить от имени этого же пользователя, что существенно повысит безопасность интернет-сервиса, и позволит контролировать ресурсы сервера штатными средствами UNIX (*limits.conf+rlimits+groups*). Более того, размещение PHP-скриптов в рабочей папки GMTSAR позволит дифференцировать виртуальные папки на веб-сервере, и персонализировать настройки процесса обработки радарных данных в каждом конкретном случае.

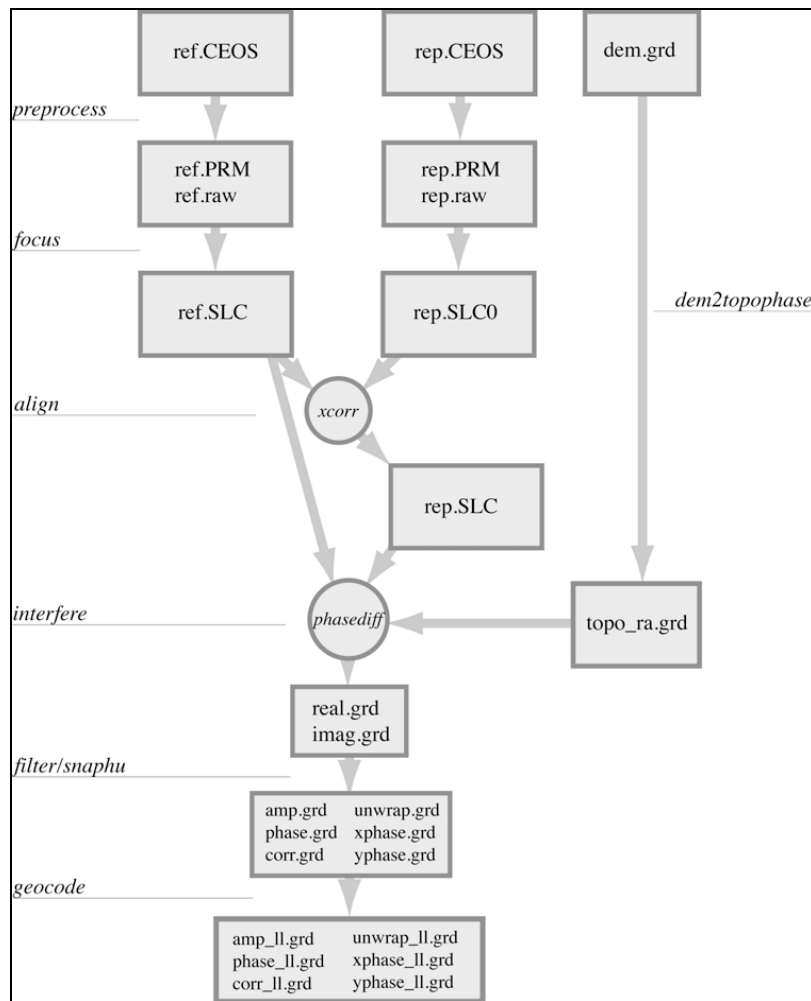


Рис. 3. Принципиальная схема 2-шаговой обработки радарных снимков.

Табл. 1. Описание csh-скриптов пакета GMTSAR.

Название	Описание
align.csh	соотнесение пары SAR снимков
align_batch.csh	соотнесение множества пар SAR снимков
baseline_table.csh	расчет базовой линии и таблицы времени
cleanup.csh	очистка рабочих директорий
dem2topo_ra.csh	конвертация DEM в координаты расстояние/азимут
filter.csh	фильтрация интерферограммы, генерация изображений амплитуды, фазы и корреляции
fitoffset.csh	вычисление параметров аффинного преобразования
geocode.csh	преобразование расстояние/азимут в широта/долгота
grd2kml.csh	генерация kml-файла для Google Earth
intf.csh	генерация интерферограммы на основе одной пары SLC-изображений
intf_batch.csh	генерация интерферограммы на основе множества пар SLC-изображений
make_a_offset.csh	сделать смещение по азимуту
make_dem.csh	создать DEM из граней
pre_proc.csh	предварительная обработка (фокусировка) пары сырых SAR-данных
pre_proc_batch.csh	предварительная обработка (фокусировка) множества пар сырых SAR-данных
process2pass.csh	создание интерферограммы от начала до конца
process2pass_envi.csh	создание интерферограммы от начала до конца для Envisat
proj_ll2ra.csh	спроецировать grd-файл из широта/долгота в расстояние/азимут
proj_ll2ra_ascii.csh	спроецировать точки высот из широта/долгота в расстояние/азимут
sarp.csh	фокусировка одного SAR-снимка
slc2amp.csh	генерация изображения амплитуды из SLC-файла
snaphu.csh	развертка фазы используя модуль snaphu
update_PRM.csh	обновить значения в PRF-файле

Аналогично размещению веб-ресурсов GMTSAR, для каждого пользователя создается ftp-ресурс для выгрузки файлов L 1.0 (*.0_A) и загрузки результатов обработки. То есть, весь функционал сервер-уровня для конкретного пользователя размещен в отдельном виртуальном и физическом пространстве на сервере, что позволяет квотировать его средствами UNIX-системы (fstab+quota).

Контроль и управление GMTSAR-процессами пользователей осуществляется посредством UNIX-утилиты (ps+top). Так как каждый пользователь запускает процесс обработки SAR-данных от своего имени, то процесс мониторинга и управления сводится к командному интерпретатору UNIX. К примеру, для принудительного завершения процесса обработки пользователя user1 применяется команда

```
killall -g < ps -f -u user1 | grep process2pass.csh | cut -d ' ' -f1.
```

Модуль "SAR Calc" включает следующие PHP-скрипты (табл. 2).

Табл. 2. PHP-скрипты модуля «SAR Calc».

Название	Описание
alos110_config.php	Непосредственно создает файл конфигурации для csh-скриптов и запускает их от имени указанного в параметре пользователя. Создает именованный UNIX-процесс.
alos110_rawSARdata.php	Возвращает список файлов (*.0_A, RAW SAR Data), выгруженные пользователем на FTP сервер.
alos110_status.php	Возвращает 1 или 0, запущен ли процесс пользователя или нет, соответственно.
alos110_log.php	Возвращает log-файл процесса работы csh-скрипта process2pass.csh
alos110_results.php	Возвращает список файлов результатов работы csh-скрипта process2pass.csh.
alos110_kml.php	Возвращает содержимое kml-файлов, созданных csh-скриптом process2pass.csh, для отображения в Google Earth Plugin

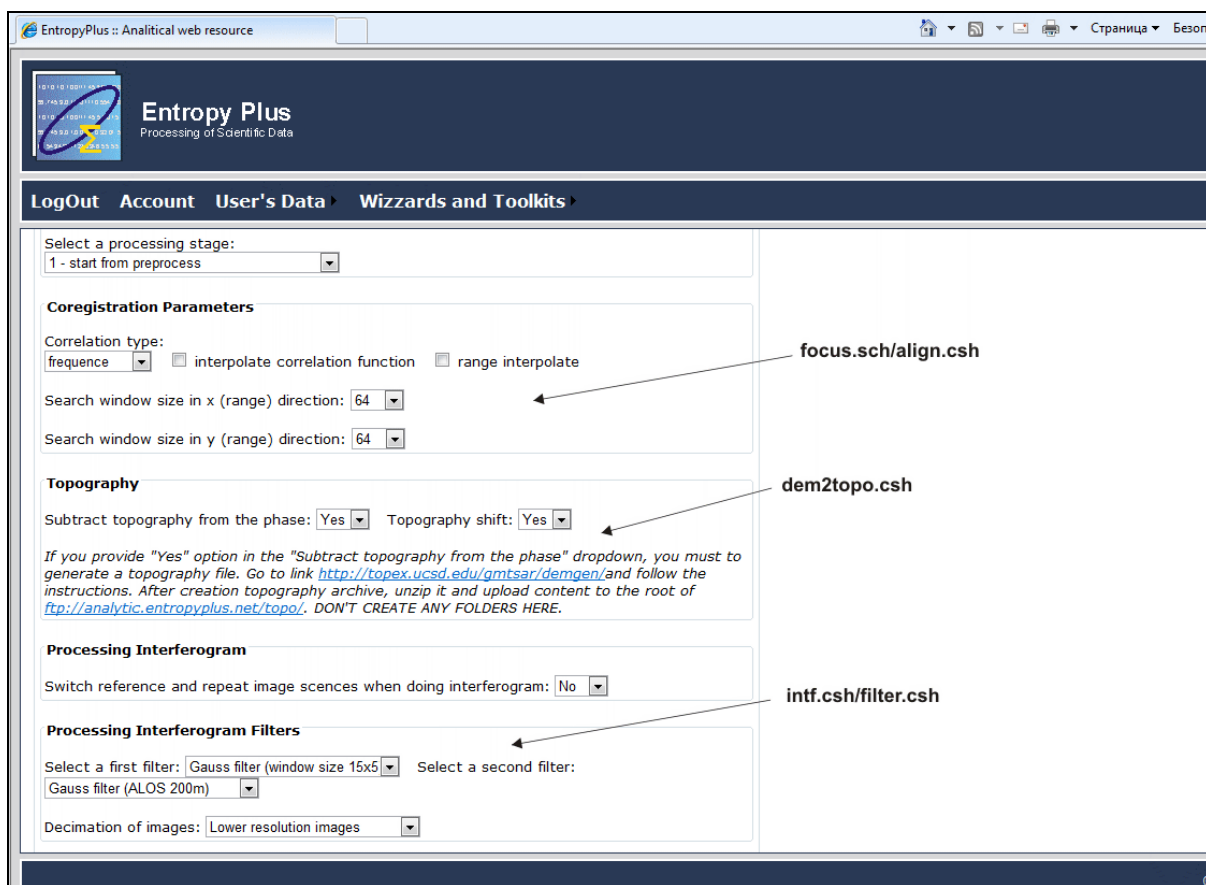


Рис. 4. Веб-форма для подготовки параметров обработки радарных данных ALOS L 1.0 пакетом GMTSAR (фрагмент).

Модуль «ALOS Processor» содержит веб-форму (рис. 3) для задания параметров конфигурационного файла GMTSAR, в виде интуитивно понятного графического интерфейса (GUI-интерфейса). Веб-форма разделена на секции, каждая из которых соответствует параметрам задаваемых для этапов

принципиальной схемы двухшаговой обработки радарных снимков (рис. 4). Форма позволяет выбрать главную и зависимую радарную сцену, предварительно загруженную на FTP-сервер (файл формата RAW SAR Data, *_0_A), а также подготовить топографическую сетку согласно географическим координатам сцен. Топографическая основа генерируется при помощи online интернет-сервиса GMTSAR (рис. 5). Функционал модуля построен на базе метода WebRequest, позволяющего получать сетевой поток ввода/вывода PHP-скриптов модуля "SAR Calc".

Модуль «ALOS Processor» содержит веб-форму (рис. 6) для просмотра результатов работы модуля «SAR Calc». Ниже представлена таблица описания файлов результатов расчета созданных на базе GMTSAR, используя csh-скрипт *process2pass.csh*.

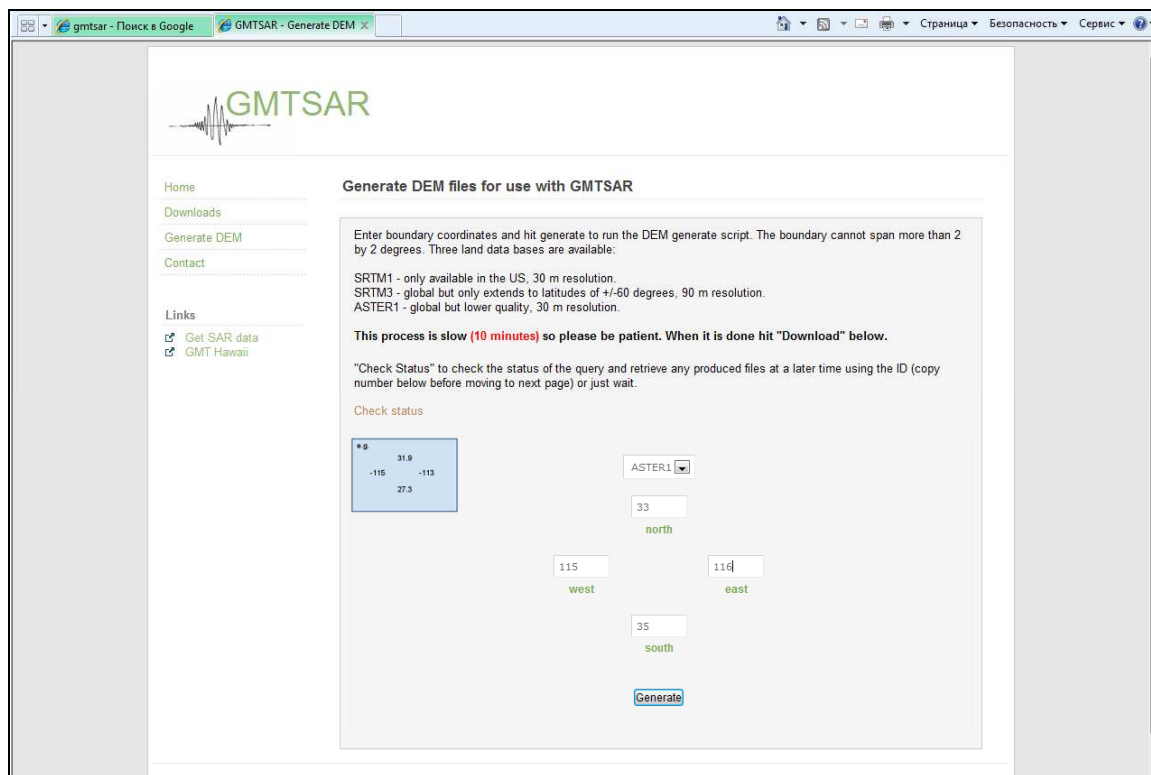


Рис. 5. Интернет-сервис GMTSAR для генерации топо-основ для радарных снимков (<http://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen>).

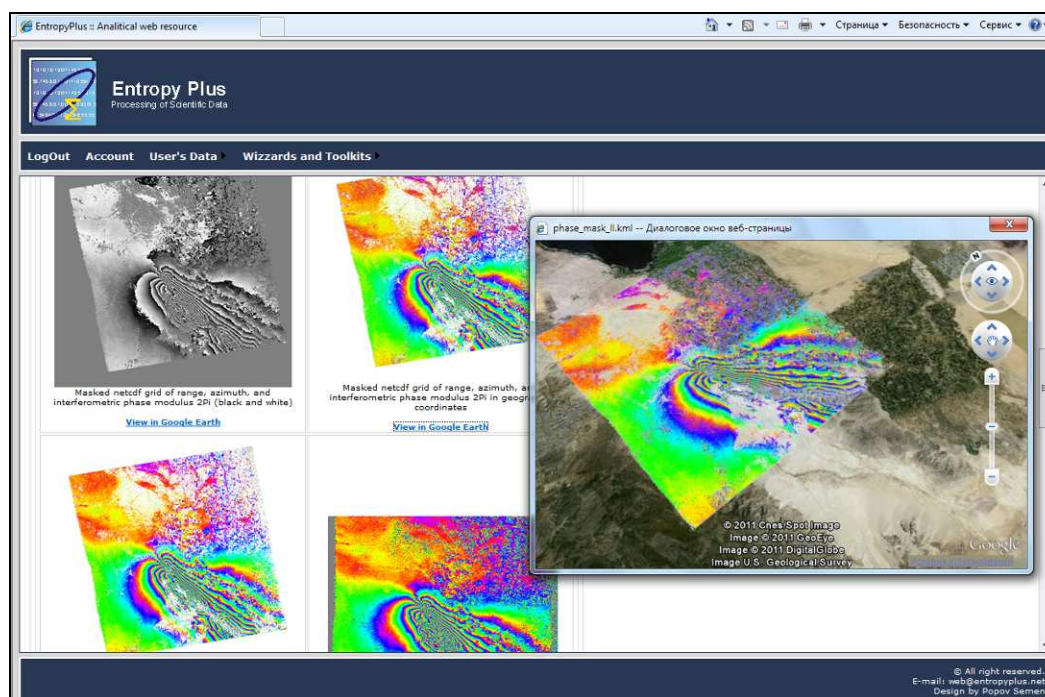


Рис. 6. Веб-форма отображения результатов модуля "ALOS Processor", с возможностью представления результатов на 3D-картах Google Earth.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<kml xmlns="http://earth.google.com/kml/2.1">
<Document>
  <name>phase_mask_ll</name>
  <GroundOverlay>
    <name>GMT Image Overlay</name>
    <Icon>
      <href>http://localhost:8082/home/user1/gmtsar/csh
        /intf/2009351_2010124/phase_mask_ll.png</href>
    </Icon>
    <altitudeMode>clampToGround</altitudeMode>
    <LatLonBox>
      <north>33.166667</north>
      <south>32.166667</south>
      <east>-115.166667</east>
      <west>-116.250000</west>
    </LatLonBox>
    <Region>
      <LatLonAltBox>
        <north>33.166667</north>
        <south>32.166667</south>
        <east>-115.166667</east>
        <west>-116.250000</west>
      </LatLonAltBox>
    </Region>
  </GroundOverlay>
</Document>
</kml>

```

Рис. 7. Формат генерируемого KML-файла для Google Earth.

Табл. 3. Описание результатов работы модуля «SAR Calc», отображаемых в веб-форме модуля «ALOS Processor».

*.SLC	Файл представляет собой SLC-изображение (Single Look Complex). 4-байтовые комплексные числа со знаком представлены, как целые числа короткого целого без знака (2-байта вещественная часть и 2-байта мнимая). Числа масштабируются, для использования полного динамического диапазона типа short integer.
trans.dat	Файл содержит отображение пары координат range/azimuth в координаты lon/lat топографии. Топография вычислена относительно локального сферического приближения к земле, и поэтому в отображении возможны большие порядки отрицательных и положительных чисел.
topo_ra.grd	Сетка формата Netcdf со значениями расстояния, азимута и топографии
phase.grd	Сетка формата Netcdf со значениями расстояния, азимута и модулированной интерференционной фазы (2π)
corr.grd	Сетка формата Netcdf со значениями расстояния, азимута и интерференционной когерентности (от 0 до 1)
xphase.grd	Сетка формата Netcdf со значениями расстояния, азимута и градиента фазы в направлении расстояния (в радиан/пиксель)
yphase.grd	Сетка формата Netcdf со значениями расстояния, азимута и градиента фазы в направлении азимута (в радиан/пиксель)
mask.grd	Сетка формата Netcdf со значениями расстояния, азимута и NaN или 1, где NaN показывает, что данные должны быть маскированы.
unwrap.grd	Сетка формата Netcdf со значениями развернутой интерференционной фазы (радианы).

Модуль SAR Calc для каждого файла в табл. 3, генерирует трансформированный файл в географических координатах (файлы с суффиксом "_ll", например, phase_ll.grd), файл формата postscript и PNG (расширение .ps и .png) и файлы изображений Google Earth (расширение .kml). Возможна комбинация таких преобразований, например файл phase_ll.ps представляет postscript описание графических объектов фазы в географических координатах.

Веб-форма модуля "ALOS Processor" позволяет просматривать эскизы результатов процесса интерферометрии (.png файлы) и их отображения в Google Earth (.kml файлы), которое реализовано на базе Google API с применением JavaScript. Причем модель Google Earth формируется динамически, т.е. при переходе по ссылке "View in Google Earth" полученный сетевой поток преобразуется в XML-описание (рис. 7), которое передается как строковая переменная JavaScript, использующему Google API (метод parseKml), сам же файл (.png) результата накладывается на рельеф как изображение в изометрии.

Заключение

Разработанный интернет-сервис является инструментом научно-практического применения интерферометрической технологии обработки радарных изображений ALOS L1.0, позволяющий в интерактивном online-режиме формировать расчетные процессы GMTSAR и просматривать результаты в графическом виде, что значительно сокращает трудоемкость и повышает качество анализа данных на базе ДДЗ, сокращая тем самым время и стоимость научно-исследовательских работ.

Литература

1. Филатов А.В. Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии // Вест. Югорского гос. ун-та. 2006. № 4. С. 103-109.
2. Евтюшкин А.В., Филатов А.В. Технология построения цифровых моделей рельефа местности и оценки смещений методом радарной интерферометрии // Вест. НГУ. Сер.: Информационные технологии. 2009. Т. 7, вып. 1. С. 66-72.
3. Sandwell D., Mellors R., Tong X. et al. GMTSAR: An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. 2010. <http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/GMTSAR.pdf>.

Интеграция географических метаданных в информационные системы общего назначения посредством ретроспективного тезауруса

Д.М. Скачков, О.Л. Жижимов

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

В настоящее время в связи с возрастающей потребностью общества в информационном обеспечении, в том числе и связанным с географическим аспектом информации, все большую актуальность приобретают разработки, направленные на интеграцию «негеографических» информационных систем с информационными системами, изначально ориентированными на обработку географической информации (ГИС). Добавление географического аспекта к информации, хранящейся в таких системах, позволяет существенно повысить функциональность навигационных, поисковых и визуализационных сервисов этих систем. Например, позволяет находить информацию, которая относится к конкретному географическому региону [9, 10]. Казалось бы, в системах мониторинга окружающей среды географические метаданные уже есть, так как такие системы являются специализированными. Но, в то же время, интеграция географических метаданных в другие системы позволит существенно упростить их взаимодействие с системами мониторинга. В частности, интеграция таких данных в электронные библиотеки, содержащие научные труды, расширит границы информационной обеспеченности исследований в области мониторинга окружающей среды.

Данный доклад посвящен подходам по эффективной интеграции географических метаданных в подобные «негеографические» информационные системы.

Далее мы будем считать, что географический аспект информации может быть зафиксирован на уровне метаданных, описывающих контент и контекст. При этом «географические» метаданные объекта могут быть заданы двумя способами:

- с помощью количественного геометрического описания географического объекта на основе координат;
- с помощью ссылки на элемент некоторого тезауруса, включающего географические названия соответствующих объектов.

Так как термин «тезаурус» может употребляться в различных значениях, в данной работе под будем говорить об информационно-поисковом тезаурусе [12].

Рассмотрим следующие варианты интеграции географических метаданных:

1. Статическая интеграция. К записям в информационной системе добавляются элементы, которые могут содержать географические координаты. После добавления, вручную или с помощью дополнительных автоматических инструментов производится заполнение элементов координатными данными, соответствующими информации, хранящейся в записи. В результате этого становится возможным производить поиск по географическому аспекту информации в информационной системе с использованием соответствующего инструментария.

Преимуществами данного подхода являются:

- 1) простота реализации поиска, по сравнению с другими подходами. По сути, достаточно будет изменить механизм формирования поискового запроса;
- 2) отсутствие (по крайней мере, частичное) необходимости в тезаурусе географических наименований.

Недостатками данного подхода являются:

- 1) необходимость использовать хранилище данных, поддерживающее работу с географическими объектами;
- 2) необходимость относительно существенного изменения схем данных в существующих системах;
- 3) для поиска по наименованию населенного пункта необходимо использовать внешний тезаурус для прямого геокодирования.

2. Статическая интеграция через ссылки на тезаурус. К записям в информационной системе добавляются ссылки на записи тезауруса, содержащего перечень наименований географических объектов, включая и их координаты. Ссылки добавляются согласно информации, хранящейся в конкретной записи информационной системы. В процессе поиска происходит запрос идентификаторов географических объектов, лежащих в целевой области из тезауруса. После чего нужно будет всего лишь отфильтровать записи информационной системы, выбрав только записи, содержащие ссылки на интересующие географические объекты.

Преимуществами данного подхода являются:

- 1) относительно простая интеграция, по сравнению с первым подходом;
- 2) меньшее количество изменений в схеме данных существующих систем.

Недостатками данного подхода являются:

- 1) более сложный процесс поиска по сравнению с первым подходом;
- 2) возможны проблемы, обусловленные неоднозначностью географических наименований.

3. Динамическая интеграция через ссылки на тезаурус. Суть данного подхода сходна с предыдущим, с тем лишь различием, что в записи информационной системы не вносятся никаких изменений. В процессе поиска из тезауруса географических объектов извлекаются наименования интересующих объектов, затем в каждой из записей целевой системы производится поиск названий интересующих географических объектов.

Преимуществом данного подхода является отсутствие необходимости вносить изменения в схемы данных существующих систем.

Недостатками данного подхода являются:

- 1) низкая скорость работы по сравнению с другими подходами;
- 2) сложности, обусловленные невозможностью повлиять на результаты конкретного поиска. Например, если в содержимом записи указано наименование географического объекта без указания уточняющей информации (название населенного пункта без региона и района), то возникает возможность появления некорректных результатов поиска в связи с неоднозначностью названий географических объектов.

После рассмотрения предложенных вариантов, видим, что наиболее подходящим является вариант интеграции при помощи статических ссылок на тезаурус.

Рассмотрим существующие тезаурусы географических наименований, которые могут представлять интерес в рамках этой задачи [4, 13].

Существует множество тезаурусов географических наименований, но сложность их использования заключается в том, что географический аспект объектов, хранящихся в информационных системах, зачастую относится не к текущему моменту времени, а к моментам времени прошедшим. В то время как большинство тезаурусов содержит информацию, относящуюся только к текущему моменту времени. Но с течением времени могут изменяться как географические названия, так и границы географических объектов, что препятствует использованию существующих тезаурусов географических наименований в подобных системах.

Следует заметить, что любые изменения географических названий и геометрических объектов, ассоциированных с ними, как правило, привязываются к какому-либо нормативному документу.

Более того, в существующих тезаурусах координаты географического объекта чаще всего задаются в виде точки, в то время как реальные координаты объекта представляют собой далеко не точку, а, в общем случае, некоторую область. Что, конечно же, также уменьшает полезность таких тезаурусов при проведении поиска. Поэтому более предпочтительным будет тезаурус, где положение объектов задано с помощью координат границ области, занимаемой объектом.

Для задач поиска, также, полезными будут данные о том, как географические объекты расположены относительно друг друга. Например, если производится поиск по некоему региону, целесообразно считать релевантными также и элементы, относящиеся к географическим объектам, лежащим в целевом регионе.

Таким образом, для использования в информационных системах общего назначения географического аспекта в его любом виде необходим тезаурус, который бы включал в себя не только географический аспект информации, но и ее временной (исторический) аспект.

Будем обращать внимание на следующие свойства тезаурусов:

1. Наличие ретроспективных данных. Возможность извлечь данные, относящиеся к прошлому.
2. Наличие связей с нормативными документами. Возможность определить, согласно какому документу было изменено название или координаты объекта.
3. Описание координат географического объекта согласно его форме. Представление географического объекта не только в виде точки, а также в виде замкнутого контура, линии, композиции примитивов.
4. Наличие связей, отражающих относительное расположение географических объектов.
5. Существующие тезаурусы географических наименований:

Getty Thesaurus of Geographic Names (Тезаурус географических имен Института Getty) - Англоязычный тезаурус, содержащий более чем миллион географических имен, информацию о континентах, физических объектах, административных сущностях и нациях современного политического мира, а также сведения об исторически значимых областях [6].

Схеме тезауруса Getty, естественно, присущи как положительные, так и отрицательные черты.

Из отрицательных черт можно отметить отсутствие информации об изменении координат географических объектов с течением времени. Координаты объекта могут быть либо точкой, либо прямоугольником, что недостаточно для полного описания области на поверхности земли.

В тоже время, в схеме данного тезауруса учтено временное изменение названия объекта с течением времени (Term_Date). Также учтены нормативные документы (Subject_Sources) для данного объекта и для его наименований (Term_Source) [2, 3]. Записи содержат данные об иерархии.

Тезаурус географических названий Российской государственной библиотеки. Содержит наименования географических объектов (городов, рек, и т. д.) на территории Российской Федерации [11, 15].

Тезаурус не содержит ретроспективных данных в записях. Невозможно получить ни данных о предыдущих названиях, ни данных о предыдущих координатах объектов.

В записях присутствуют ссылки на нормативные документы, определяющие наименование объекта.

Координаты географических объектов заданы в виде координат точек, что не совсем соответствует действительности.

Из записей могут быть получены данные об иерархических связях с помощью обработки. Явным образом иерархические связи не указаны.

Служба геокодирования API Карт Google. Позволяет определить координаты объекта, а также найти адрес наиболее близкий к указанным координатам [8].

В записях, предоставляемых данной службой отсутствуют ретроспективные данные. Отсутствуют связи с нормативными документами.

Координаты объектов указаны в виде точки или в виде прямоугольной области.

В записях содержатся иерархические связи.

В то же время стоит отметить, что тезаурус содержит данные не только о крупных географических объектах, но так же и об адресах. Есть возможность произвести обратное геокодирование.

Служба геокодирования API Яндекс.Карт. Имеет функциональность, аналогичную геокодеру Google [14]. Обладает практически теми же достоинствами и недостатками, но из дополнительных достоинств можно выделить более обширную базу российских наименований географических объектов.

Таким образом, проанализировав существующие решения, мы приходим к выводу что схемы тезауруса с необходимой нам функциональностью нет. Но есть достаточно близкие схемы, которые можно изменить для реализации желаемой функциональности. Наиболее подходящей схемой является схема тезауруса географических наименований Getty. Ее и примем за основу.

Сформулируем список требований тезаурусу, подходящему для использования при внедрении в электронные библиотеки.

1. Структура тезауруса должна позволять эффективно решать следующие задачи:
 - прямое и обратное геокодирование;
 - ретроспективное прямое и обратное геокодирование;
 - позволять включать информацию в технологию поиска в существующих информационных массивах.
2. Содержать внутренние связи:
 - по географическим объектам;
 - по временным характеристикам;
 - по документам.
3. Тезаурус должен быть представлен в схеме, максимально приближенной к какой-либо стандартной.
4. Он должен однозначно отображаться на другие схемы тезаурусов, в частности необходимо однозначное соответствие профилю Z-Thes [7], быть может, расширенному, для интеграции с существующими информационными системами.

Для хранения данных о том, как географические объекты соотносятся друг с другом будем использовать иерархическую структуру записей тезауруса, т. е. каждая запись (кроме корневой) содержит одного родителя (географический объект, внутри которого расположен указанный объект).

Каждая запись содержит первичное название, являющееся основным названием данного объекта на локальном языке. Также запись может содержать множество дополнительных названий объекта [5].

Так как необходимо будет ссылаться на элементы тезауруса из других систем, то каждая запись должна иметь уникальный квалификатор. Наиболее подходящим для данной задачи представляется использование UUID идентификатора [6]. Данный квалификатор уникально идентифицирует запись тезауруса о географическом объекте и может быть использован при внедрении географической информации в информационную систему.

Рассмотрим подробнее элемент, представляющий наименование географического объекта. Каждый элемент наименования содержит собственно название, тип объекта, код языка [1], и ссылки на нормативные документы, вводящие в действие данное название и отменяющее его. Привязка нормативных документов к наименованиям географических объектов обеспечивает ретроспективную составляющую названий.

Запись, представляющая документ содержит поля с описанием документа, его URI, датой создания документа и датой вступления изменений в силу.

По причине того, что координаты географических объектов также изменяются с течением времени, в элементы, представляющие географические координаты объектов, также добавлены ретроспективные составляющие в виде ссылок на нормативные документы.

Заключение

В работе были рассмотрены варианты интеграции географических метаданных в информационные системы общего назначения, рассмотрен вариант интеграции с помощью тезауруса географических

наименований. Проведен обзор существующих тезаурусов, обоснована необходимость создания тезауруса для ретроспективного геокодирования.

Дальнейшей целью работы является интеграция разработанного тезауруса с информационными системами общего назначения.

Литература

1. Codes for the Representation of Names of Languages.
http://www.loc.gov/standards/iso639-2/php/code_list.php
2. Contribute to the Getty Vocabularies.
<http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/contribute.html>
3. Getty Thesaurus of Geographic Names® Online.
<http://www.getty.edu/research/tools/vocabularies/tgn/index.html>
4. Introduction To Metadata.
http://www.getty.edu/research/publications/electronic_publications/intrometadata/crosswalks.html
5. ISO 5964:1985. Guidelines for the establishment and development of multilingual thesauri.
http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?ics1=01&ics2=140&ics3=20&csnumber=12159
6. RFC 4122 – A Universally Unique IDentifier (UUID) URN Namespace. <http://tools.ietf.org/html/rfc4122>
7. The Zthes specifications for thesaurus representation, access and navigation. <http://zthes.z3950.org>
8. Геокодирование – Службы API Карт Google.
<http://code.google.com/intl/ru/apis/maps/documentation/geocoding>
9. Жижимов О.Л., Мазов Л.А. Проблемы географической привязки цифровых объектов в электронных библиотеках // Тр. XII Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2010). Казань, Россия, 2010.
10. Жижимов О.Л., Мазов Н.А. География и стандарты метаданных для электронных библиотек: содержание, применение, проблемы // Электронные библиотеки. 2009. Т. 12, № 1.
<http://www.elbib.ru/index.phtml?page=elbib/rus/journal/2009/part1/ZM>
11. Лавренова О.А. Многоязычный доступ к данным на основе тезауруса географических названий // Сб. тез. постерных докл. 9-й Всерос. науч. конф. «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» (RCDL'2007). Переславль-Залесский, Россия, 15-18 окт. 2007 г. Переславль-Залесский: Изд-во «Университет города Переславля», 2007. С. 57-62.
http://rcdl.ru/doc/2007/paper_56_v1.pdf
12. Лукашевич Н.В. Тезаурусы в задачах информационного поиска. М.: Изд. Московского унив-та, 2011. 512 с.
13. Перечень классификаторов ИР сферы образования. <http://doc.unicor.ru/classifiers/classifierslist.htm>
14. Поиск по карте – Яндекс.Карты. <http://api.yandex.ru/maps/geocoder>
15. Тезаурус РГБ. http://aleph.rsl.ru/F/?func=file&file_name=find-b&local_base=tst11

Геоинформационная система мониторинга шумового загрязнения городского центра

И.А. Суторихин, С.А. Литвиненко

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул

Физическое (шумовое) воздействие - одна из серьезнейших экологических проблем многих участков городской территории, вызванная воздействием транспорта. Зоны акустического дискомфорта представляют собой участки территории (вместе с застройкой), в пределах которых уровни звука превышают допустимые по санитарным нормам величины. Эти территории находятся в непосредственной близости к крупнейшим автомобильным и железным дорогам, а также вблизи аэропортов. Создание акустического благополучия в городе – проблема многих отраслей градостроительства. Ее решение возможно только при комплексном подходе, максимально учитывающим все геоэкологические особенности исследуемой территории. Наиболее точно это возможно сделать при использовании геоинформационных систем и технологий.

Для контроля за уровнем шума рассматривается созданная геоинформационная система (ГИС). В ГИС основой является система сбора информации о состоянии уровней шума и классификация объектов. Наличие классификаторов позволяет сформировать системы баз данных для накопления сведений об объектах исследования, а система сбора информации позволяет наполнить эти базы данными, отображающими состояния шумового загрязнения сложившейся застройки, промышленной зоны, и характер распространения шумовых полей в планируемых градостроительных решениях (рис. 1).

фильтр А (дБ)	фильтр В (дБ)	фильтр С (дБ)	фильтр дин (дБ)			
65	70	82	86			
октава 1 Гц	октава 2 Гц	октава 4 Гц	октава 8 Гц	октава 16 Гц	октава 31 Гц	октава 63 Гц
75	68	64	62	70	72	74
октава 125 Гц	октава 250 Гц	октава 500 Гц	октава 1000 Гц	октава 2000 Гц	октава 4000 Гц	октава 8000 Гц
74	68	66	60	55	50	46

Рис. 1. Заполненная форма базы данных.



Рис. 2. Фрагмент выделенной зоны акустического дискомфорта.

В основу при создании ГИС были положены: «карта-схема города Барнаула», данные из справочника «Дубль ГИС» и космоснимки с Интернет-сервиса «Google map». На основе этих материалов были построены векторные слои ГИС.

После этого производится расчет уровней шума и сравнение полученных значений с санитарными нормами. На основании существующих ограничений строятся зоны акустического дискомфорта, которые накладываются на космоснимки и растровые подложки и позволяют визуализировать зону дискомфорта (рис. 2).

Для оценки акустического режима примагистральных территорий разработанная пространственно-картографическая модель на базе расчетно-аналитического модуля с применением ГИС-технологий позволяет повысить точность расчетов, дистанционно рассчитать уровень шума в интересующей нас точке города и наглядно отразить получаемые результаты в удобной для пользователя форме.

Реализация территориально-распределенной информационно-измерительной системы на основе автоматических метеостанций АМК-03 для мониторинга и прогнозирования опасных метеорологических явлений

А.А. Тихомиров, А.Я. Богусевич, В.В. Кольчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск

Введение

Опасные метеорологические явления (ОМЯ), к которым относятся ураганы, шквалы, перенос загрязняющих веществ при техногенных катастрофах, развиваются в приземном слое атмосферы и являются достаточно сложно прогнозируемыми событиями. Это обусловлено как редкой сетью постов наблюдения Росгидромета, так и длительными сроками обновления информации на этой сети (через 3 часа), а также недостаточным уровнем использования современных метеорологических моделей прогнозирования.

На основе разработанных в ИМКЭС СО РАН и производимых совместно ООО «Сибаналитприбор» ультразвуковых автоматических метеостанций АМК-03 [1], работающих в непрерывном режиме измерения основных метеорологических величин с частотой опроса датчиков до 80 Гц, создан прототип территориально-распределенной информационно-измерительной системы (ИИС). Первая информация об этой ИИС приведена в [4], а более подробное описание – в [3]. В данном сообщении представлены первые результаты работы этой системы.

Описание системы

Инструментальную основу ИИС составляет сеть постов УАМС АМК-03, измеряющих основные метеорологические величины: скорость и направление горизонтального ветра; скорость вертикального ветра; температуру воздуха; относительную влажность и атмосферное давление с возможной частотой опроса датчиков до 80 Гц и усреднением измеренных значений метеовеличин за интервал от 1 до 20 минут [1]. Кроме того, в состав инструментальной части ИИС входят сервер для сбора данных с сети постов УАМС и система связи между УАМС и сервером (рис. 1), а также специальное программное обеспечение [3]. Разработанный прототип ИИС включает три поста измерений.

Места территориального размещения постов УАМС выбирались, исходя из нескольких критериев:

- 1) нахождение в розе основных ветров Томской области (перед г. Томском);
- 2) близость расположения к стационарным источникам питания;
- 3) возможность использования сотовой связи для передачи данных с постов УАМС на сервер сбора информации;
- 4) вандалозащищенность мест установки аппаратуры.

Центральный пункт, размещенный на территории Института, включает один пост УАМС АМК-03 и сервер для сбора метеорологической информации. Выносные посты УАМС по своему составу идентичны посту 1. Основным элементом УАМС АМК-03 является датчик метеорологических параметров ДСВ-15 [1]. Он включает ультразвуковой термоанемометр, который обеспечивает измерение первичных физических величин – времен распространения ультразвуковых импульсов в воздухе в трех ортогональных направлениях для вычисления трехкомпонентного вектора ветра и температуры воздуха, а также датчики атмосферного давления и влажности, которые вырабатывают электрические сигналы, пропорциональные этим метеовеличинам. Пакет электрических сигналов передается на компьютер, где с использованием программы «МЕТЕО 3.0» на основе известных алгоритмов производится последующее определение мгновенных значений искомых метеовеличин. Малый вес и габариты датчика ДСВ-15, его низкое энергопотребление и способность к длительной эксплуатации без технического обслуживания позволяют размещать его на различных существующих инженерных объектах и сооружениях (метеорологических мачтах, вышках сотовой связи, крышах зданий и т.п.).

Для построения на основе УАМС АМК-03 пространственно разнесенной ИИС, работающей в реальном масштабе времени, использованы коммутационные контроллеры передачи данных, которые осуществляют связь датчиков ДСВ-15 с сервером [2]. Схема построения системы связи показана на рис. 2. Контроллер соединяется с сервером данных через Интернет с помощью встроенных в него интерфейса связи Ethernet (кабельный канал) и GSM-GPRS модема (канал сотовой связи). Наличие в модеме лифтов для двух SIM-карт обеспечивает беспроводную работу контроллера в сетях двух операторов мобильной связи стандарта GSM. Для обеспечения буферизации, первоначальной обработки и передачи данных устройство оснащено оперативной памятью емкостью 64 кбайт. На сервере работает специальное программное обеспечение (ПО), которое ожидает соединения с контроллером. Если установлено соединение с одним или несколькими контроллерами, на сервер начинают поступать данные с постов УАМС. ПО сервера позволяет настраивать режимы работы контроллеров и следить за текущим состоянием соединения.

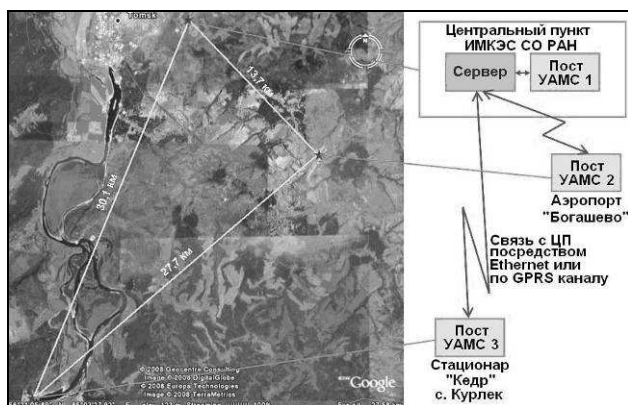


Рис. 1. Схема территориального размещения постов УАМС.

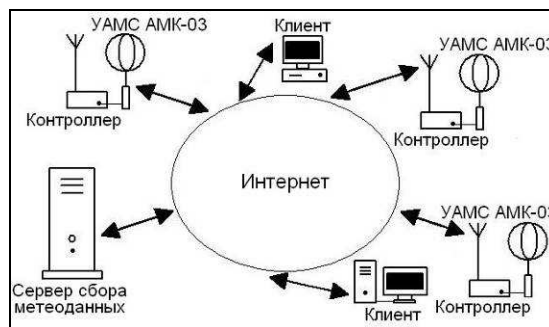


Рис. 2. Схема построения системы связи и обмена информацией в ИИС.

Для создания банка данных мгновенных значений метеовеличин, поступающих с трех постов УАМС, и последующего использования этих данных разработано дополнительное ПО. Для сервера сбора метеоданных разработана серверная программа в виде сайта (по адресу <http://meteot.imces.ru>), которая поддерживает соединение с коммутационными контроллерами и сохраняет получаемые от них первичные данные измерений УАМС АМК-03 в разработанной для этой цели базе данных. Администратор сайта имеет возможность проверять работоспособность постов УАМС, изменять периодичность их опроса и время усреднения данных, а также при необходимости удалять в базе данных некорректные записи. Разработан и отлажен протокол информационного сопряжения через Интернет клиентских программ, используемых конечными пользователями системы, с серверной программой, позволяющий им запрашивать измерительную информацию из базы данных на сервере.

Разработанное клиентское ПО (Windows-приложения «АМК-клиент»), позволяет на удаленном рабочем компьютере пользователя запрашивать и получать через Интернет как текущие, так и за любой предыдущий период, результаты измерений УАМС. Данная программа вычисляет из запрошенных с сервера первичных данных измерений УАМС физические значения метеорологических величин с учетом индивидуальных градуировочных параметров используемых в системе средств измерений с возможностью визуального просмотра результатов обработки в графическом виде и сохранения ее в файлах. Взаимодействие сервера и клиентской программы осуществляется по специально разработанному протоколу.

Приборы	Пользователи	Импорт данных	Выйти			
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ПРИБОРОВ 01.08.2011 16:09:27						
Коннект	Серийный номер	Размещение	Телефон	IMEI-код	Усреднение (кадров)	Добавить
0	66	Отладочный	+790627801081	353098003375356	10	редактировать удал
15418399	67	Аникино	+7913-869-51-98	353098003375357	10	редактировать удал
1721934	68	ИМКЭС	Ethernet	353098007344978	10	редактировать удал
2061061	69	Богашево	+7913-869-62-52	353098003375358	10	редактировать удал
111621	70	Польнянка	+790627801084	353098003375359	100	редактировать удал
47118	71	Новый 2		353098003372510	10	редактировать удал
8	72	Новый 3		353098003836134	1	редактировать удал
135	73	Новый 4			300	редактировать удал
11	74	Новый 5		359986013187189	60	редактировать удал
23654	75	Новый 6			1	редактировать удал
866	76	Autoappend		353098007344978	10	редактировать удал
27531	1000	Autoappend		353098007344978	60	редактировать удал
7486	10066	Autoappend		353098003372510	1	редактировать удал

Рис. 3. Сервер – страница контроля и управления системой постов УАМС.

Приведенное на рис. 3 окно ПО сервера показывает его возможности работы с группой постов УАМС (в общем случае количество обслуживаемых постов УАМС определяется пропускной способностью модемной связи и Интернетом). В 1-м столбце таблицы показано количество пакетов информации, полученных от УАМС и ее состояние на данный момент времени: зеленым цветом выделяются УАМС, передающие информацию в момент соединения, желтым – УАМС, соединение с которыми осуществлено, но информация, по каким-либо причинам, не поступает, красным – УАМС, соединение с

которыми на данный момент времени отсутствует. Это позволяет оператору быстро оценивать функциональное состояние ИИС в целом. Также указываются серийные (или порядковые) номера УАМС, подключенных к системе, места их расположения, телефонные номера и IMEI-коды. Кроме того, приводится установленная частота передачи данных для каждой УАМС (частота опроса датчика метеорологических параметров ДСВ-15).

Все параметры доступны для редактирования администратору системы. Для изменения параметров конкретной метеостанции необходимо пройти по соответствующей ссылке редактировать в правом столбце. Вкладка **Пользователи** позволяет администратору регистрировать новых и удалять имеющихся пользователей системы, а также управлять их правами.

Первые результаты

Существующая тестовая система построена на основе трех непрерывно работающих постов УАМС – «Аникино», «ИМКЭС» и «Богашево» (временно вместо поста «Курлек» одна из УАМС была размещена на полигоне ТУСУРа «Аникино», примерно на середине трассы «Курлек» – «ИМКЭС»). На рис. 4 приведен снимок экрана, на который выведены окна сервера и окна трех клиентских программ, одновременно принимающих и визуализирующих метеоданные с указанных постов.

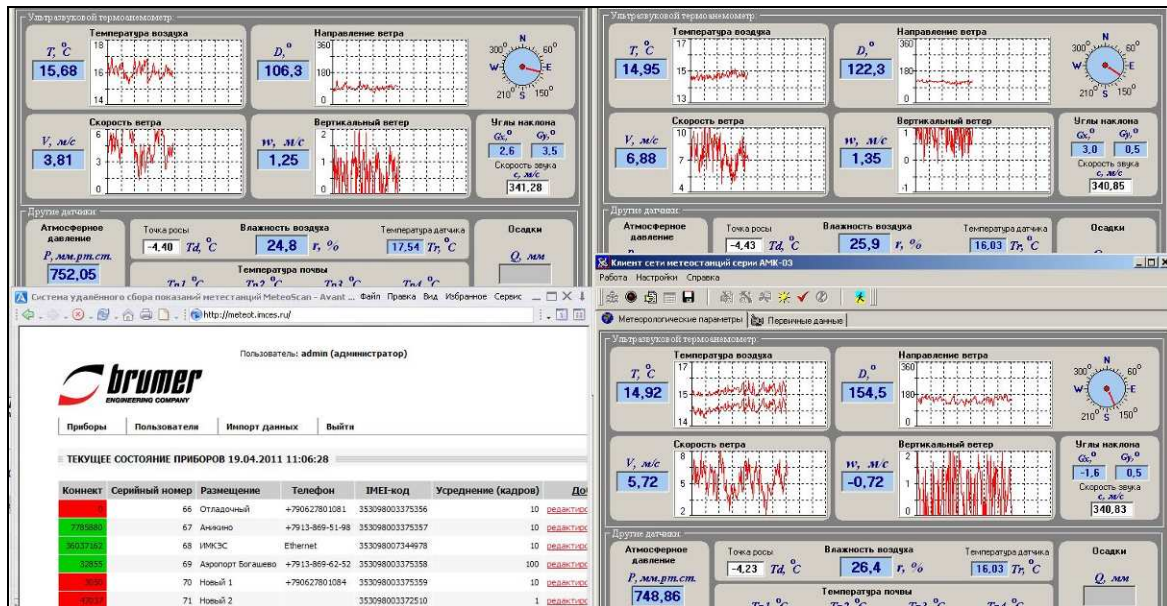


Рис. 4. Реализация тестовой системы из трех постов УАМС.

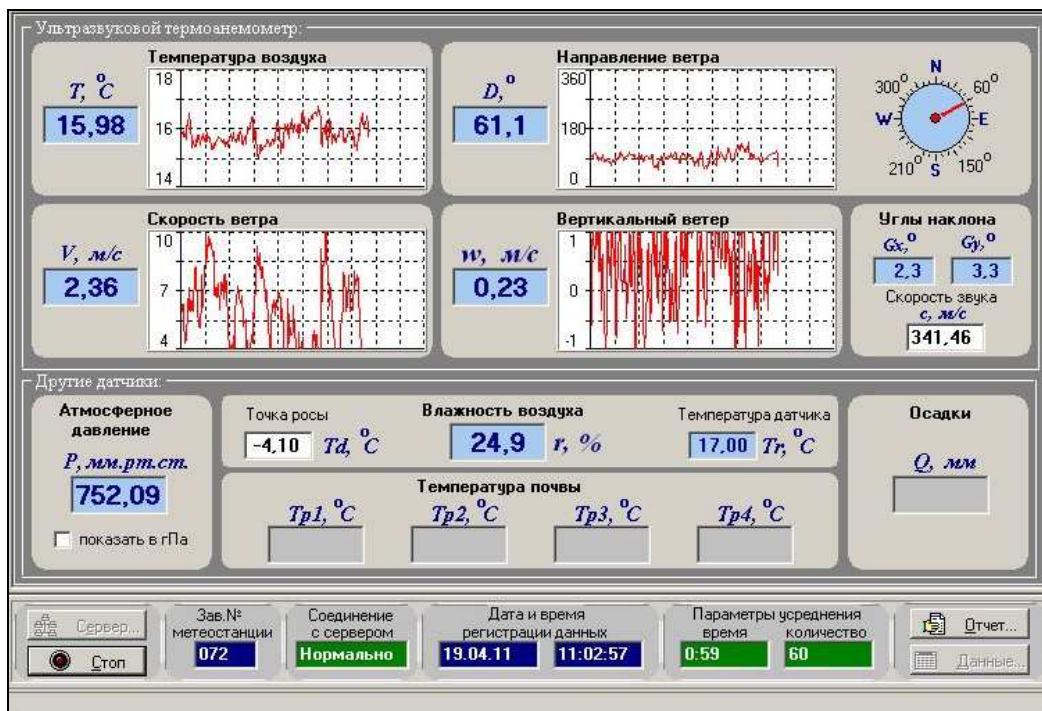


Рис. 5. Клиентская программа обработки и визуализации метеоданных AMK-netClient.

Окно клиентской программы, обрабатывавшей данные поста «Аникино» 19 апреля 2011 г., представлено на рис. 5. Наличие заметной вертикальной составляющей скорости ветра обусловлено особенностями размещения данного поста на полигоне – а именно, близостью высокого берега реки Томь. Как видно из рисунка, в клиентском окне отображаются не только метеовеличины, измеряемые датчиком ДСВ-15, но и технические характеристики поста – номер метеостанции, углы отклонения датчика ДСВ-15 от вертикали (G_x°, G_y°), значения которых учитываются при вычислении параметров ветра, параметры усреднения метеоданных, статус соединения с сервером. Кроме того, видно, что система может передавать и обрабатывать данные дополнительных датчиков. Например, в состав комплекта УАМС могут включаться датчики температуры почвы и измерители атмосферных осадков.

Возможности территориального метеопрогноза

Высокая частота измерений метеорологических величин, выполняемых УАМС АМК-03, и сохранение их значений в базе данных компьютера позволяют получать временные ряды со значениями каждой из измеряемых величин $\xi_k = \xi(t_k)$ в дискретные моменты времени t_k , относящиеся к одной пространственной точке. Подобные ряды можно использовать для прогностических оценок их дальнейшей временной эволюции на основе применения известных алгоритмов с использованием фильтра Калмана. Один из вариантов такого фильтра (Калмана-Бьюси) был синтезирован на компьютере, и с его помощью выполнены сверхкраткосрочные прогнозы (до 6 часов) временной эволюции температуры воздуха T , атмосферного давления P , абсолютной влажности воздуха q , зональной U и меридиональной V составляющих скорости ветра. При этом использовалось временное усреднение значений ξ_k на интервале 20 минут с периодичностью δ регистрации усредненных значений, равной также 20 минутам [3].

В качестве математической модели временной эволюции для каждой из измеряемых метеовеличин ξ применен алгебраический полином с изменяющимися во времени коэффициентами $a_0(t), a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)$:

$$\xi(t_0 + \tau) = a_0(t_0 + \delta) + a_1(t_0 + \delta) \tau + a_2(t_0 + \delta) \tau^2 + \dots + a_n(t_0 + \delta) \tau^n. \quad (1)$$

Здесь t_0 – время последнего измерения параметра ξ ; τ – интервал временной экстраполяции ξ ; a_1, a_2, \dots, a_n считаются медленно меняющимися на интервале τ случайными процессами, значения которых для последующего срока измерения $t_0 + \delta$ вычисляются в каждый текущий момент t_0 .

Для вычисления коэффициентов $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, входящих в (1), использовалась фильтрация Калмана значений прогнозируемой величины $\xi(t_k)$, измеренных в предыдущие моменты времени $t_k = t_0 - (k - 1) \delta$, где $k = 1, 2, 3, \dots, m$ (m – используемое число циклов работы фильтра Калмана). При этом применялось дополнительное априорное условие $a_0(t_0 + \delta) = \xi(t_0)$. Параметр $\delta t = (m - 1) \delta$ является периодом упреждения для начала выполнения измерений метеовеличины ξ , который требуется для набора объема данных измерений $\xi(t_k)$ к моменту t_0 , достаточного для минимизации ошибки прогнозирования. В рамках теории фильтрации Калмана коэффициенты $a_0(t), a_1(t), a_2(t), \dots, a_n(t)$ сводятся в дискретный по времени вектор-столбец состояний анализируемой динамической системы

$$\mathbf{X}(k) = | X_1(k), X_2(k), X_3(k), \dots, X_{n+1}(k) |^T, \quad (2)$$

где интервал дискретизации между соседними значениями k можно задавать только кратным или равным периоду δ поступления данных измерений. Фильтр Калмана обеспечивает оценку $\hat{\mathbf{X}}(k+1)$ вектора состояния системы на последующий $(k+1)$ -ый шаг цикла его работы с минимальной дисперсией. Используя ее, можно далее выполнять прогнозы $\hat{\xi}$ значений ξ на требуемые интервалы времени τ вперед по формуле, вытекающей из принятой модели (1):

$$\hat{\xi} = \hat{X}_1 + \hat{X}_2 \tau + \hat{X}_3 \tau^2 + \dots + \hat{X}_{n+1} \tau^n. \quad (3)$$

Для определения оптимальных параметров используемого алгоритма прогнозирования выполнены оценки $\hat{\xi}$ с использованием полиномов со степенями n от 1 до 6 включительно и с интервалами упреждения δt в 1, 2, 3, ..., 7 часов. Прогноз значений ξ выполнялся на 1, 2, 3, ..., 6 часов вперед. При этом дополнительно вычислялись ошибки прогноза как $\Delta \xi = \hat{\xi} - \xi$ и далее из них – среднеквадратическая за выбранный период наблюдений погрешность прогноза – СКО($\hat{\xi}$). Расчеты показали, что предлагаемый метод позволяет выполнять с хорошей точностью прогнозы значений всех основных метеовеличин на сроки τ , не превышающие 6 часов. Исследуя метод для различных комбинаций параметров калмановской фильтрации, можно сделать вывод, что оптимальной с точки зрения минимизации погрешности прогнозирования является использование комбинации полинома 3-й степени с интервалом упреждения δt , примерно равным сроку прогнозирования τ , в котором выполняется не менее 9-ти циклов работы фильтра Калмана.

В создаваемой ИИС, содержащей группу пространственно разнесенных УАМС АМК-03, описанный метод прогнозирования будет расширен на 3-х мерный (пространственно-временной) случай. В нем метеовеличины ξ рассматриваются как функции времени t и двух пространственных координат x и y . При этом вместо (1) используется разложение $\xi(t, x, y)$ в ряд Тейлора по 3-м аргументам, а для описания

состояния динамической системы вместо вектора-столбца (2) используется трехмерная матрица. Это позволит использовать в ИИС не только временные прогнозы, но и интерполяцию и экстраполяцию приземных значений метеорологических величин по территории, контролируемой ИИС.

Заключение

Созданная инструментальная часть ИИС обеспечивает:

- получение и сбор первичной информации о значениях метеорологических величин в реальном масштабе времени с территориально разнесенных УАМС АМК-03;
- кодирование и беспроводную (GSM-GPRS модем) или проводную (Ethernet) передачу первичных данных на веб-сервер ИИС;
- декодирование и сохранение этих данных на веб-сервере;
- формирование, кодирование, передачу и декодирование команд управления режимами работы УАМС с управляющего веб-сервера ИИС;
- обработку и форматирование данных, поступающих с УАМС, и передачу их на клиентские рабочие станции для использования в вычислительных моделях формирования краткосрочного локального прогноза возможного развития метеорологической ситуации;
- организацию системы санкционированного доступа пользователей к ресурсам информационно-измерительной системы.

Создается банк данных метеорологических величин, поступающих с 3- постов УАМС, с частотой опроса датчиков – 1 Гц. Начата отработка технологии краткосрочного прогноза (до 6-ти часов) временной эволюции измеряемых метеорологических величин на основе калмановкой фильтрации данных измерений за предыдущий период, получаемых на трех территориально разнесенных УАМС АМК-03.

Работа выполняется при финансовой поддержке Программы СО РАН (проект № VII.66.1.2) и РФФИ (гранты № 09-05-99014р_офи и № 11-05-98062-р_сибирь_a).

Литература

1. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Ильичевский В.С и др. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорология и гидрология. 2006. № 11. С. 89-97.
2. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А. и др. Коммутационный контроллер передачи метеорологических данных // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 166.
3. Богомолов В.Ю., Богусевич А.Я., Гордов Е.П. и др. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 53-59.
4. Тихомиров А.А., Азбукин А.А., Богомолов В.Ю. и др. Информационно-измерительная система для обнаружения опасных метеорологических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. Отдельный выпуск № ОВ18 «Кузбасс-3». С. 124-129.

Перспективы применения гидрохимической ориентированного программного комплекса для оценок ионного состава природных вод Кузбасса

Е.Л. Счастливцев, С.Г. Пушкин, А.А. Воротилов

Институт вычислительных технологий СО РАН (кемеровский филиал), Кемерово

С целью автоматизации процесса обработки больших объемов гидролого-гидрохимической информации о техноприродных водах Кузбасса и получения их обобщенных характеристик, в среде Matlab создается пакет программ, позволяющий вычислять мониторинговые показатели вод различного происхождения (дождевых, речных, подземных, стоковых и т.д.), которые в последующем используются при идентификации источников загрязнения и оценках их вкладов [1-3]. Общая схема пакета представлена на рис. 1.

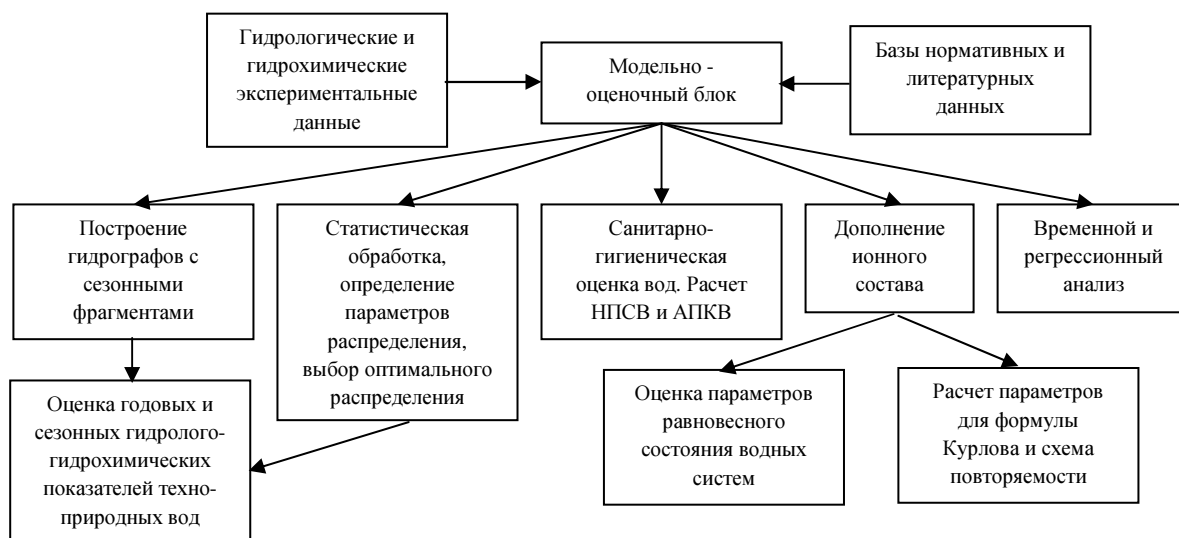


Рис. 1. Общая схема программного комплекса.

В гидрологической части программы предусмотрена обработка годовых массивов данных по расходам рек с целью построения гидрографов, выделения гидрологических сезонов (зимняя межень, половодье, летне-осенняя межень, дождевые паводки) и определения для них статистических показателей табл. 1. Эти данные, наряду с химическим составом проб, использовались для выявления сезонных и межсезонных закономерностей формирования различных типов вод. Так, например, гидрограф р. Средняя Терсь за 1993 г. с выделенными гидрологическими сезонами выглядит следующим образом (рис. 2).

В работе использованы данные ряда организаций осуществляющих мониторинг на территории Кемеровской области [3, 4], полученные с использованием различных методик, содержащие различное количество определяемых ингредиентов, и зачастую характеризованные по неполному составу ионов. Так, например, в водах р. Ускат и Средняя Терсь определяются ионы NO_3^- , NO_2^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , и, как правило, не определяется ион натрия. Поэтому на начальном этапе автоматизации выполнялись вычислительные процедуры по восстановлению данных для основных ионов: натрия, кальция, магния, сульфатов, гидрокарбонатов и хлоридов, а характеристики остальных ионов используются в расчетах показателей недостающих ионов из основной группы, и в последующих модельных расчетах.

Табл. 1. Статистические показатели сезонных расходов воды р. Средняя Терсь за 1993 г. (m^3/c).

	<i>N</i>	Средн.	Ст. откл.	Мин.	Макс.
Зим. меж.	92	12,9	1,7	10,7	19,2
Полов	106	180,0	132,3	21,1	538,0
Лет. меж.	46	27,9	9,7	18,9	63,3
Дожд. пав.	70	78,3	48,7	23,0	216,0
Ос-зим. м.	51	15,0	2,0	12,5	20,3

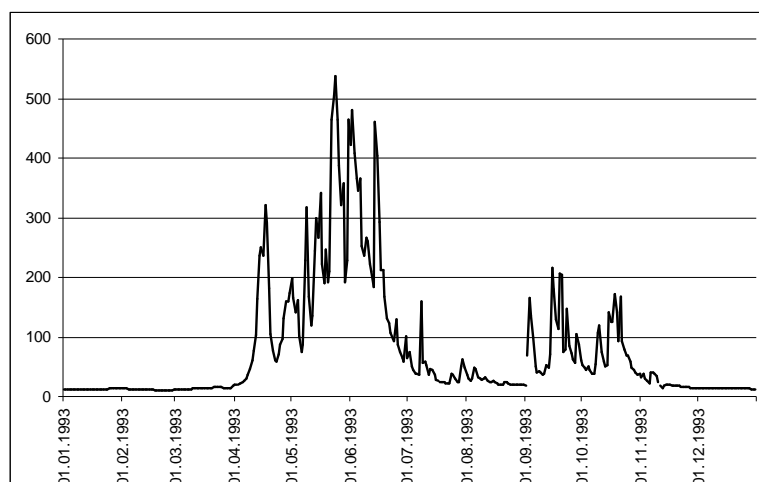


Рис. 2. Гидрограф р. Средняя Терсь за 1993 г. с сезонным расщеплением.

Для сравнения использовались базы данных, созданные на основе, как правило, осредненных показателей, приводимых различными авторами, напр. [5-7].

Для каждого из ингредиентов определялся вид распределения (рассматривались нормальное, логнормальное и вейбула), наиболее пригодный (оптимальный) для описания массива данных, и рассчитывались статистические показатели для двух наиболее часто используемых распределений нормального и логнормального (рис. 3 и табл. 2). В качестве критерия оптимальности использовалась сумма квадратов отклонений (СКО) от экспериментальных данных.

Табличные данные свидетельствуют, что для гидрокарбонатов подземных вод оптимальным является распределение Вейбула, а для вод р. Ускаат нормальное.

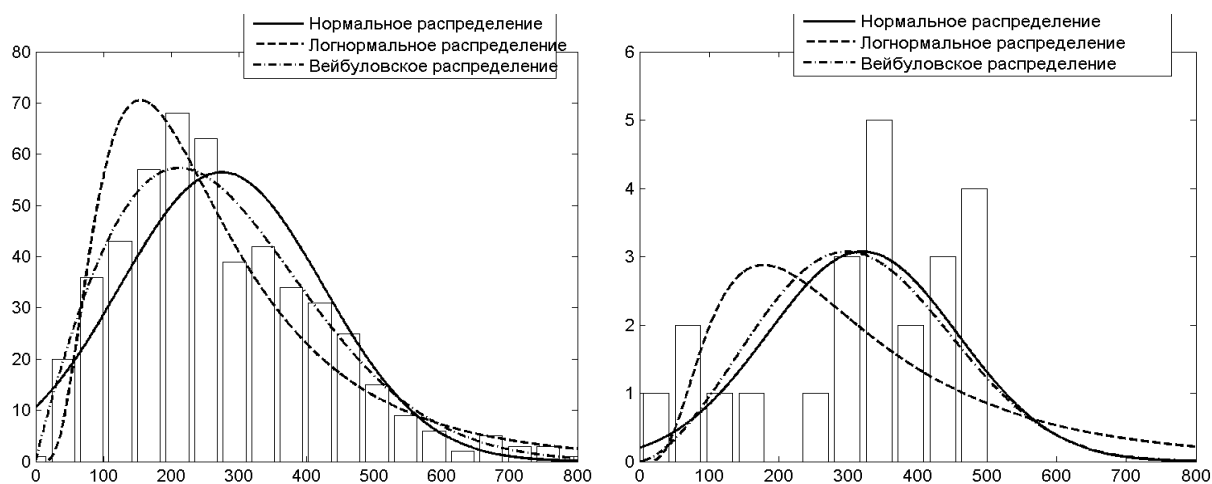


Рис. 3. Распределение содержаний гидрокарбонатов в подземных водах (слева) и в р. Ускаат (справа).

Табл. 2. Статистические параметры содержания ионов в подземных водах и стоках.

	Подз. воды		Ускаат		ш. Егозозская		р. Камышанский	
	CA	HCO ₃	CA	HCO ₃	CL	SO ₄	CL	SO ₄
N	504	504	23	23	20	20	28	27
ср. арифм.	42,3	274,7	51,1	358,8	82,5	144,8	98,6	4,6
ст. отклон.	32,1	150,0	30,8	98,1	15,3	44,2	24,5	2,7
ср. геом.	31,0	231,4	39,3	338,2	80,9	138,3	96,0	4,2
лев. гр. ДИ	13,3	122,6	16,9	224,0	65,4	101,0	76,1	2,8
прав. гр. ДИ	72,5	436,7	91,6	510,8	100,0	189,4	121,1	6,4
мин. выб.	1,8	14,0	6,3	67,3	42,4	82,0	34,0	1,9
макс. выб.	286,6	856,4	122,7	504,6	105,0	246,0	160,5	16,2
Опт. распр.	вейб	вейб	логн	норм	логн	норм	вейб	вейб
СКО	0,4	0,02	0,06	0,02	0,82	0,1	0,07	0,07

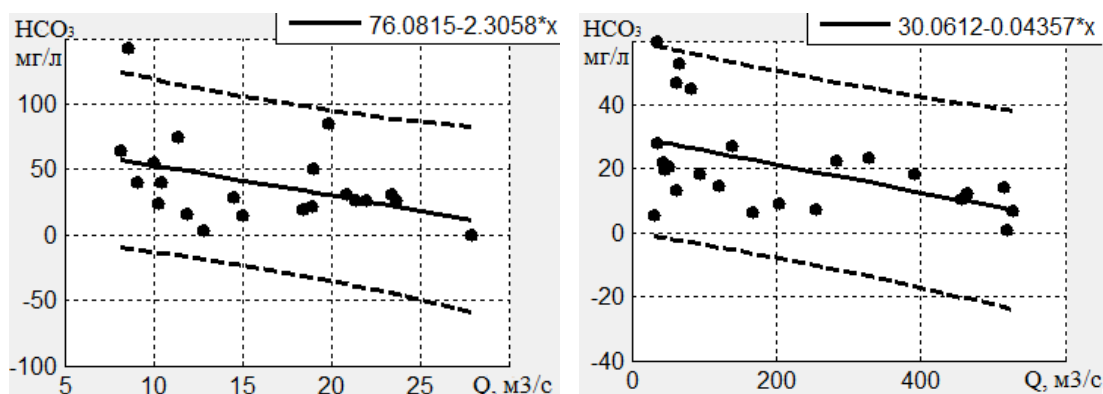


Рис. 4. Зависимость концентрации гидрокарбонатов от расходов воды в р. Средняя Терсь в межень и половодье 1989-1999 гг.

Один из блоков программы позволяет вычислять корреляционные зависимости, между измеряемыми ингредиентами и расходами воды в реке. Корреляции гидрокарбонатов с расходом воды представлены для р. Средняя Терсь рис. 4.

Данные рис. 4 и табл. 3 свидетельствуют о том, что реализуются различные тенденции поведения ингредиентов в зависимости от расхода воды, как возрастающие, так и убывающие. Судя по уравнениям регрессии скорость убывания содержаний гидрокарбонатов в зависимости от расхода воды в межень, по сравнению с половодьем, значительно больше (в 33 раза для р. Средняя Терсь, в 19 раз для р. Ускат). Аналогичные тенденции реализуются для сульфатов и минерализации (Ср. Терсь, Ускат) и нитрата (Ускат). В водах р. Ускат для шести ингредиентов (аммоний, нитрат, магний, фосфат, хлорид, водород) в меженные и паводковые периоды реализуются противоположные зависимости их концентраций от расхода, убывающие и возрастающие соответственно. Для магния (р. Ср. Терсь), в противоположность этому, в меженный период проявляется возрастающая зависимость, а в половодье убывающая. Концентрация кальция (р. Ср. Терсь) в меженный период убывает в 50 раз быстрее, чем в половодье, а в р. Ускат растет в 220 раз быстрее, чем в половодье. Это, по-видимому, свидетельствует о различиях процесса формирования содержаний ионов в различные гидрологические сезоны.

Воды схожего происхождения часто имеют характерные особенности состава, к примеру, в шахтных водах наблюдаются высокие значения концентрации взвешенных веществ, минерализации. Зависимости концентраций ионов от взвешенных веществ и минерализации и ионов водорода (pH) позволяют выявить общие закономерности происхождения, для тех или иных ассоциаций. Так для гидрокарбонатов (р. Ускат, рис. 5) реализуются следующие тенденции: их рост в зависимости от минерализации и убывание в зависимости от взвешенных веществ, тенденции некоторых других ионов представлены в табл. 4.

При санитарно-гигиенической оценке вод нами используются нормализованные показатели, характеризующие долевой состав воды, по отношению в основном к предельно допустимым концентрациям ингредиентов [8], а также ассоциативные показатели, демонстрирующие коллективную загрязненность вод той или иной группой ингредиентов [1-3], табл. 5.

Табл. 3. Параметры регрессионных зависимостей ионов от расходов речных вод.

	р. Ускат				р. Средняя Терсь			
	Половодье		Межень		Половодье		Межень	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Аммоний	0,003	0,97	-0,77	2,39	0,0001	0,12	0,003	0,06
Нитрат	0,003	0,83	-0,16	1,4	3E-04	0,08	0,02	0,08
Нитрит	-0,0006	0,06	-0,004	0,04	4E-06	0,003	0,002	0,02
Сульфат	-0,2	67,7	-15,3	113	-0,0002	5,5	-0,03	5,7
Гидрокарбонат	-3,4	246	-66	471	-0,07	44,2	-2,3	76
Кальций	0,05	30	11,3	32	-0,01	11,3	-0,5	18,5
Магний	0,03	14	-7,2	44,6	-0,02	11	0,03	4,7
Кислотность (pH)	0,001	8	-0,07	8	-6E-05	7	-0,1	8,8
Минерализация	-4,8	444	-106	823	-0,1	76	-3	116
Фосфат	0,001	0,05	-0,15	0,4	3E-05	0,003	6E-06	0,01
Хлорид	0,001	10,9	-8	36,4	5E-04	1,13	0,05	0,7

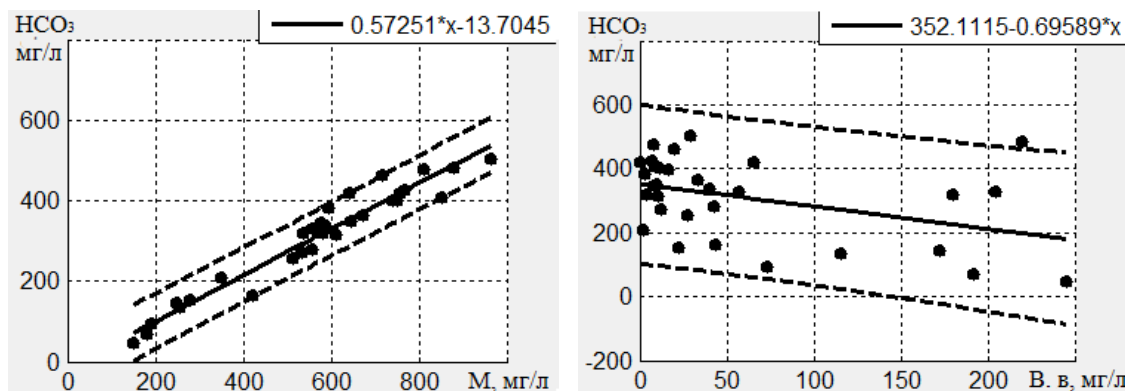


Рис. 5. Зависимость концентрации гидрокарбонатов от минерализации и взвешенных веществ в р. Ускат 1996-2000 гг.

Табл. 4. Параметры регрессионных зависимостей ионов от взвешенных веществ, минерализации и pH.

	Ускат						Средняя Терсь					
	Минерализация		Взвешенные		pH		Минерализация		Взвешенные		pH	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
Аммоний	-2E-05	1,06	-0,001	1,2	-2,7	23	0,0004	0,09	-5E-05	0,13	0,01	0,05
Гидрокарбонат	0,57	-13,7	-0,69	352	163	-1024	0,75	-11,2	0,03	33,4	6,9	-15
Кальций	0,05	17,8	-0,1	52	-6	95	0,13	1,4	0,02	9,2	1,8	-3,8
Магний	0,036	7,2	-0,08	33	24,7	-174	0,04	4,3	-0,05	7	1,1	-1,2
Нитрат	0,001	0,4	-0,003	1,3	0,45	-2,6	0,001	0,2	-0,0007	0,3	0,02	0,12
Нитрит	-2E-05	0,05	-1E-05	0,03	-0,005	0,08	-2E-05	0,009	3E-06	0,07	-0,001	0,02
Сульфат	0,13	9,4	-0,12	87	107	-798	0,005	5,1	0,04	5	0,4	2,3
Фосфат	0,0001	0,07	-0,0006	0,2	-0,03	0,37	2E-05	0,01	-5E-05	0,01	-0,002	0,02
Хлорид	0,04	1,33	-0,05	23	4,5	-16,8	-0,002	1,45	-0,004	1,4	0,18	0,02

Табл. 5. Многолетние НПСВ речных вод.

	ПДК	Средняя Терсь		Ускат		Аба	
		средние	НПСВ	средние	НПСВ	средние	НПСВ
Аммоний	0,5	0,15	0,31	1,39	2,78	1,99	3,98
Нитрат	40	1,31	0,03	4,9	0,12	10,34	0,26
Нитрит	0,08	0,03	0,41	0,13	1,64	0,27	3,4
Гидрокарбонаты	240	33,72	0,14	309,72	1,29	302	1,26
Кальций	180	9,45	0,05	46,04	0,26	37,38	0,21
Магний	40	6,62	0,17	27,87	0,7	27,43	0,69
Сульфаты	100	5,39	0,05	80,97	0,81	76,69	0,77
Фосфаты	0,25	0,01	0,04	0,14	0,58	0,08	0,33
Хлориды	300	1,35	0,005	19,9	0,07	30,92	0,1
Натрий	120	1,91	0,02	68,1	0,57	48,9	0,41

Данные табл. 5 свидетельствуют о том, что воды Средней Терси по санитарно-гигиеническим показателям являются достаточно чистыми ($НПСВ_i < 1$). Воды р. Ускат и р. Аба загрязнены аммонийным и нитритным азотом, а также гидрокарбонатами ($НПСВ_i > 1$), ассоциативные показатели для них равны 1.98 и 2.88 соответственно.

Оценки перенасыщенности вод $CaCO_3$ осуществлялись с использованием системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 [H_2CO_3] * f_{H_2CO_3} &= P_{CO_2}(T, P) * K_{CO_2}, \\
 [H^+] f_{H^+} * [HCO_3^-] * f_{HCO_3^-} &= K_1 * [H_2CO_3] * f_{H_2CO_3}, \\
 [H^+] f_{H^+} * [CO_3^{2-}] * f_{CO_3^{2-}} &= K_2 * [HCO_3^-] * f_{HCO_3^-}, \\
 [Ca^{2+}] * f_{Ca^{2+}} * [CO_3^{2-}] * f_{CO_3^{2-}} &= L, \\
 2 * [Ca^{2+}] + [H^+] - 2 * [CO_3^{2-}] - [HCO_3^-] &= \Sigma_{an} - \Sigma_{кат},
 \end{aligned}$$

Создаваемый гидрохимически-ориентированный программный комплекс при обработке больших массивов экспериментальных гидролого-гидрохимических данных для различных техно-природных вод, позволяет выявлять модельные закономерности формирования ионного состава речных вод, что способствует выработке научно-обоснованных рекомендаций по совершенствованию существующих систем мониторинга.

Выражаем благодарность Беспалову Анатолию Александровичу, участвовавшему в формировании баз данных техно-природных вод.

Литература

1. Счастливцев Е.Л., Пушкин С.Г., Юкина Н.И. Проблемы современных оценок состояния поверхностных вод в угледобывающих районах и возможности совершенствования системы мониторинга техноприродных вод // Матер. I Междунар. научно-практич. конф. «Эколого-биологические проблемы Сибири и сопредельных территорий». Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та, 2009. С.163-169.
2. Счастливцев Е.Л., Пушкин С.Г., Юкина Н.И. Гидроэкологические проблемы недропользования в Кузбассе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. Отдельный выпуск № ОВ4. С. 419-429.
3. Счастливцев Е.Л., Юкина Н.И., Пушкин С.Г. Перспективы мониторинга техноприродных вод Кузбасса // Матер. третьей всерос. науч. конф. с междунар. участием. Барнаул: Изд-во «АРТ», 2010. С. 566-569.
4. Фондовые материалы Кемеровского филиала Института вычислительных технологий СО РАН.
5. Шварцев С.Л. Гидрохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
6. Корж В.Д. Геохимия элементного состава гидросферы. М.: Наука, 1991. 243 с.
7. Дривер Дж. Геохимия природных вод: пер. с англ. М.: Мир, 1985. 440 с.
8. Нормативные документы (Приказ от 18.01.2010 Росрыболовства «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»; ГН 2.1.5.1315 -03; Сан-ПиН 2.1.5.980 – 00; ДСан-ПиН 2.2.4-171-10; Сан-Пин 2.1.4.116-02.

Технология веб-публикации оперативных данных по лесным пожарам

А.В. Токарев

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

Основными компонентами существующей системы охраны лесов России, обеспечивающими реализацию мероприятий по профилактике, обнаружению и тушению лесных пожаров являются: специализированная служба авиационной охраны лесов, лесопожарные подразделения, персонал и технические средства лесхозов и других организаций, привлекаемые для борьбы с огнем в условиях высокой и чрезвычайной горимости лесов [1]. На территории Красноярского края организацией и выполнением авиационной и наземной охраны лесов и других природных ландшафтов от пожаров занимается государственное предприятие Красноярского края «Лесопожарный центр».

Для информирования населения и учреждений существует потребность в регулярном размещении данных о пожарной обстановке в сети интернет. В рамках данной работы решается задача веб-публикации возникающих пожаров и динамики их развития на картографической основе. Для этого был разработан программный модуль «Карта пожарной обстановки», в котором реализованы следующие функции:

- автоматический импорт данных о пожарах и их динамике из обменного XML-формата по расписанию;
- многокритериальная фильтрация пожаров по периоду времени, авиаотделениям, лесничествам, типам и статусам пожаров;
- визуализация выборки из пожаров на интерактивной карте Красноярского края;
- отображение динамики пожара, его статуса, площади, количества задействованных людей и использованных средств тушения.

Оперативные данные по реальным пожарам поступают в диспетчерский пункт ГП КК «Лесопожарный центр» через различные каналы связи. Диспетчер анализирует информацию и вносит данные в программу оперативного учета – 1С: Предприятие «Учет пожаров». Передача данных в модуль «Карта пожарной обстановки» реализован через процедуру экспорта-импорта XML-файла обменного формата. В нем содержатся основные справочники, список зарегистрированных пожаров и данные по динамике их развития в заданном периоде времени.

Разработка выполнялась на языке сценариев PHP 5 с использованием фреймворка Yii (<http://www.yiiframework.com>). Yii (easy, efficient, extensible) – это высокоэффективный PHP-фреймворк для разработки веб-приложений. Он основан на компонентной структуре и позволяет максимально применить концепцию повторного использования кода, существенно ускоряя процесс веб-разработки. Для хранения данных использована СУБД PostgreSQL 8.x с модулем PostGIS 1.5. Отображение картографических данных выполняется через библиотеку MapServer на сервере и библиотеку OpenLayers на клиенте. Источником топографической основы является тайловый WMS-T сервис ООО «ТОРИНС» (<http://www.torins.ru>).

Предложенное решение построено на основе свободно распространяемых технологий и программного обеспечения. В настоящее время созданный модуль размещен на официальном сайте ГП КК «Лесопожарный центр» (<http://www.lpcentr.ru>).

Литература

1. Коровин Г.Н., Исаев А.С. Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России // Лесной бюллетень, 1998. № 8-9.