

Оценка пространственно-временного распределения потоков метана по спутниковым данным и прогнозам по модели переноса и диффузии

Платонова М.В.* , Котлер В.Д. * ,
Климова Е.Г.*

*ФИЦ ИВТ СО РАН

Оценка потоков метана с поверхности Земли:

- Разработка современной системы усвоения реальных спутниковых данных для оценки источников парниковых газов очень важна ввиду ряда экологических и экономических факторов.
- Используется подход, основанный на применении систем усвоения данных с привлечением математических моделей распространения пассивных примесей в атмосфере
- Под усвоением данных принято понимать совместное использование данных моделирования и данных наблюдений для получения оптимальной оценки состояния моделируемого процесса.

Постановка задачи: специфика

- Разработка алгоритма усвоения данных для трехмерной модели распространения примеси в атмосфере с использованием спутниковых данных.
- Реализуется шаг анализа ансамблевого фильтра Калмана (детерминированный ансамблевый алгоритм).
- В качестве результатов математического моделирования взяты расчеты модели MOZART-4, а в качестве данных наблюдений использованы спутниковые данные AIRS.
- Апробация алгоритма оценивания потоков парниковых газов по данным о концентрации с использованием спутниковых данных

Оценка значений потоков парниковых газов (математическая модель)



NCAR
UCAR

Глобальная трехмерная транспортная модель (MOZART-4)

- Данные расчета на всей поверхности Земли
- Сетка с шагом $\sim 2,8^\circ$
- Модельная область 64 узла на 128 узла
- Расчет концентрации газа на 28 уровнях (можно задавать)
- Исходный код в открытом доступе

Наблюдения (спутниковые данные AIRS)

- Атмосферный инфракрасный зонд на спутнике NASA
- Ежедневно собирает инфракрасную энергию, излучаемую земной поверхностью и атмосферой во всем мире.
- Данные обеспечивают трехмерные измерения температуры и водяного пара в атмосферном столбе, а также множество газовых примесей, свойств поверхности и облаков.
- Используются центрами прогнозирования погоды по всему миру для улучшения своих прогнозов. Они также используются для оценки климатических моделей и различных приложений, от обнаружения вулканических шлейфов до прогнозирования засухи.

Данные для экспериментов:

Информация о концентрации - спутники AIRS

Информация о прогнозах - модель MOZART-4

Данные предоставили коллеги:

- Лагутин Анатолий Алексеевич
доктор ф-м наук, профессор
- Мордвин Егор Юрьевич
кандидат ф-м наук, доцент

[Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А. «Метан в атмосфере западной Сибири», Барнаул, 2016]

Схема численных экспериментов

1) В алгоритмах обработки больших объемов спутниковых данных для оценки потоков парниковых газов принято проводить оценку для заданного временного интервала (например, неделя), считая, что значения потоков постоянны в течение этого временного периода.

Потоки считаются постоянными, работа производится в заданном интервале.

2) Поверхность Земного шара разбивается на регионы, для которых производится оценка (благодаря локальности используемого алгоритма).

Процедура оценки потоков проводится отдельно для заданных подобластей.

Схема численных экспериментов

- 3) При наличии информации задаются начальные (климатические) значения потоков в регионах, а также матрицы ковариаций ошибок наблюдений и модели. (считаем потоки = 0, можно брать оценку с прошлого шага или первое приближение)
- 4) Данные наблюдений разбиваются на блоки по временным интервалам, а затем по подобластям.
- 5) Модель переноса и диффузии рассчитывает прогноз по заданным начальным значениям концентраций и потоков в течение временного периода с заданным временным шагом, затем производится интерполяция в точку наблюдений и момент времени, в который производится наблюдение.
- 6) Производится шаг анализа и находятся оценки

Численные эксперименты по оценке потоков с поверхности Земли

- взяты подобласти России $1000\text{км} \times 1000\text{км}$
- производился поиск оценок потоков по данным о концентрации
- использовались данные расчёта модели MOZART-4 за 2005 год
- использовались спутниковые данные за 2005 год:
AIRS/Aqua L2 Standard Physical Retrieval (AIRS-only)
Vo06 (AIRS2RET)

АНСАМБЛЕВЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА

первое приближение \rightarrow
генерируем ансамбль
первых приближений

$$x_0^{F(i)} = x_0^f + \sigma_i; \sum \sigma_i = 0$$

наблюдения \rightarrow генерируем
ансамбль наблюдений

$$y_n^i = y_n + \varepsilon^i; \sum \varepsilon_i = 0$$

ШАГ ПРОГНОЗА

$$x_{n+1}^{F(i)} = A_n x_n^{A(i)} \text{ ансамбль прогнозов}$$

$$\bar{x}_{n+1}^F = \frac{\sum_{i=1}^k x_{n+1}^{F(i)}}{k} \text{ средний прогноз}$$

$$P_{n+1}^F = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k (x_{n+1}^{F(i)} - \bar{x}_{n+1}^F)(x_{n+1}^{F(i)} - \bar{x}_{n+1}^F)^T$$

матрица ковариаций ошибок прогноза

ШАГ АНАЛИЗА

$$K_n = P_n^F H^T (H P_n^F H^T + R_n)^{-1} \text{ матрица усиления}$$

$$x_{n+1}^{A(i)} = x_{n+1}^{F(i)} + K_n (y_{n+1}^{(i)} - H x_{n+1}^{F(i)})$$

ансамбль оценок вектора состояния

$$\bar{x}_{n+1}^A = \frac{\sum_{i=1}^k x_{n+1}^{A(i)}}{k} \text{ средняя оценка ансамбля анализов}$$

$$P_{n+1}^A = \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k (x_{n+1}^{A(i)} - \bar{x}_{n+1}^A)(x_{n+1}^{A(i)} - \bar{x}_{n+1}^A)^T$$

матрица ковариаций ошибок оценки

LETKF

(LOCAL ENSEMBLE TRANSFORM KALMAN FILTER)

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{D}\mathbf{x}_f \tilde{\mathbf{P}}_a \left(\mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{x}_f \right)^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}_0 - \mathbf{H}\mathbf{x}_f)$$
$$\tilde{\mathbf{P}}_a = \left[(N-1)\mathbf{I} + \left(\mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{x}_f \right)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{x}_f \right]^{-1}$$

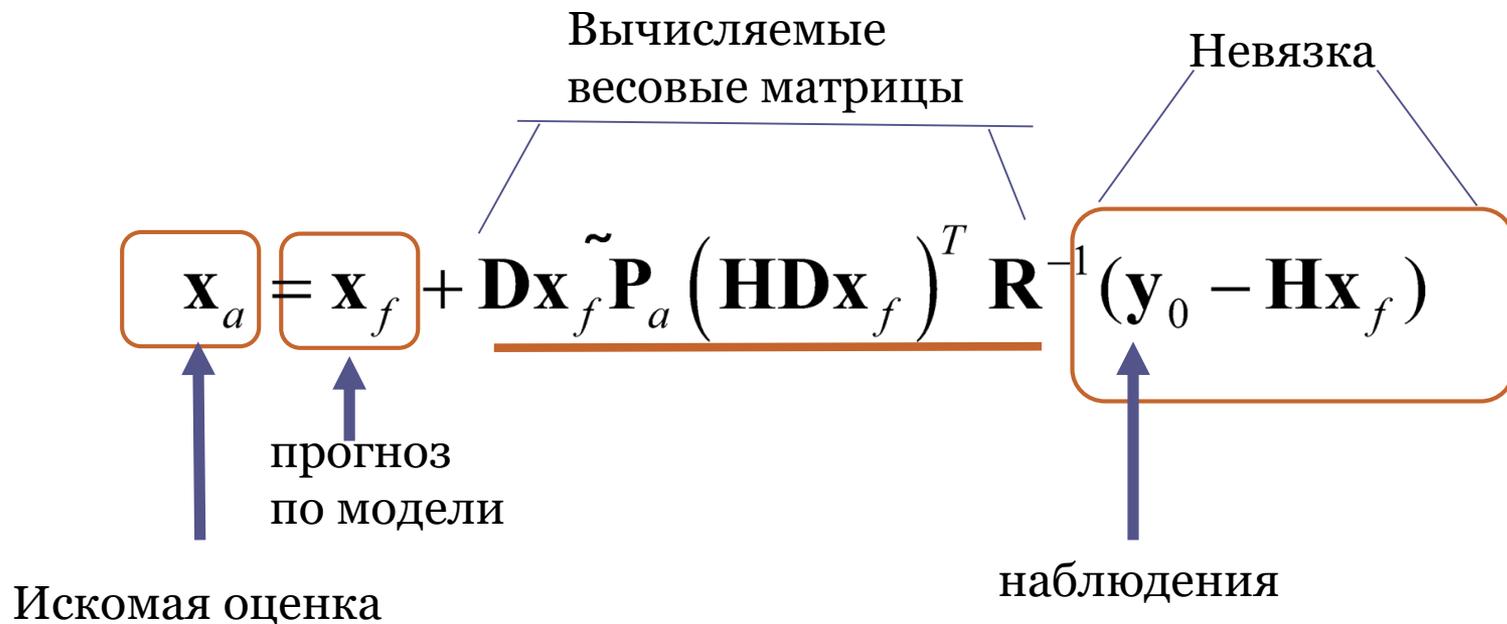
Причем:

$$\mathbf{P}_f = \mathbf{D}\mathbf{x}_f \mathbf{D}\mathbf{x}_f^T \quad \text{ковариационная матрица ошибок прогноза}$$

$$\mathbf{D}\mathbf{x}_f = \frac{1}{\sqrt{N}} [\mathbf{dx}_f^1, \dots, \mathbf{dx}_f^N]^T \quad \text{ансамбль ошибок прогноза}$$

[HOUTEKAMER, FUQING ZHANG: Review of the Ensemble Kalman Filter for Atmospheric Data Assimilation, 2016]

LETKF (LOCAL ENSEMBLE TRANSFORM KALMAN FILTER)



$$\tilde{\mathbf{P}}_a = [(\mathbf{N} - 1)\mathbf{I} + (\mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{x}_f)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}\mathbf{D}\mathbf{x}_f]^{-1}$$

локальность алгоритма позволяет:

- использовать разбиение по подобластям
- разбиение поверхности Земли на квадраты равной площади (1000 км на 1000 км) и вычислять алгоритм внутри них
- оценка среднее по подобласти значение потока
- проводить усвоение независимо друг от друга в отдельных узлах

Оценка потоков: шаг прогноза и анализа

Оценка значений потоков по данным наблюдений и прогнозу производится по стандартной формуле фильтра Калмана (шаг анализа)

$$\mathbf{x}_a = \mathbf{x}_f + \mathbf{K}[\mathbf{y}_0 - H(\mathbf{x}_f)]$$

- \mathbf{x}_a , \mathbf{x}_f – оцениваемые и смоделированные потоки парниковых газов
- \mathbf{y} – данные наблюдений
- \mathbf{K} – матрица усиления

Принимаем уравнение изменения потоков по времени (на шаге прогноза) следующим:

$$\mathbf{x}_f^{n+1} = \mathbf{x}_f^n$$

Первичная обработка данных модели MOZART-4

Обработка данных, и организация структуры хранения:

- В этой работе используется подход, основанный на декомпозиции области модели
- Данные группируются по областям 1000км на 1000км
- Интерполяция по высоте в точки наличия наблюдений
- Данные MOZART-4 рассчитываются каждые 6 часов (окно усвоения ± 4.5 часа с момента прогноза по модели)

Первичная обработка спутниковых данных AIRS

Обработка данных, и организация структуры хранения:

- Формирование списка данных наблюдений для оценки потока
- Вычисление невязок:
 - 1) окно усвоения 4.5 часа
 - 2) расстояние не более 50 км от точки MOZART-4 до точки измерения AIRS

- Контроль:

при уровне ошибок в данных наблюдениях $\sigma=20$ ppb, данные отбрасываются и не используются в усвоении

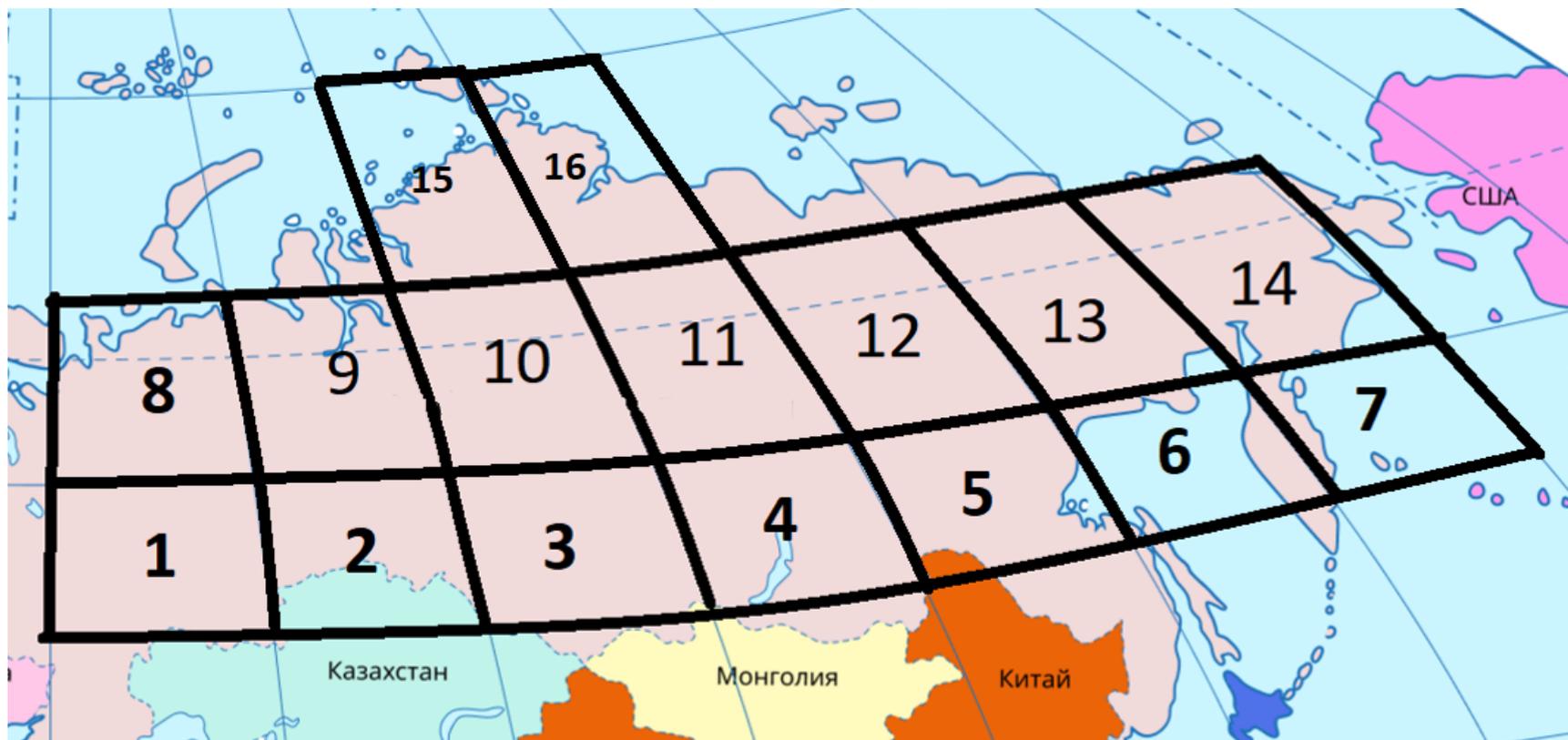
Численные эксперименты с модельными данными

Модельный поток/ отсутствие потока	Оценка без первого приближения	Оценка с первым приближением
30 ppb	22 ppb	27 ppb
0 ppb	5 ppb	2 ppb

- наличие предварительной информации о наличии потока позволяет достичь более высокой точности при оценке потока
- в численных экспериментах моделировалось увеличение концентрации метана, а далее проводилась оценка потока метана на основе информации о концентрации метана из модели и из данных наблюдений
- таким образом, полученная оценка фактически является восстановлением информации о потоке

Численные эксперименты

- усвоение проводилось для 16 подобластей 1000км на 1000 км
- были взяты данные за 2005 год
- проводилось осреднение полученной оценки в подобласти
- проводилось осреднение за 7-дневный период



Численные эксперименты с реальными данными

Для набора векторов $\{\vec{\varphi}_1, \dots, \vec{\varphi}_N\}$,

где $\vec{\varphi}_i$ - вектор оценок в момент времени t_i для всех подобластей:

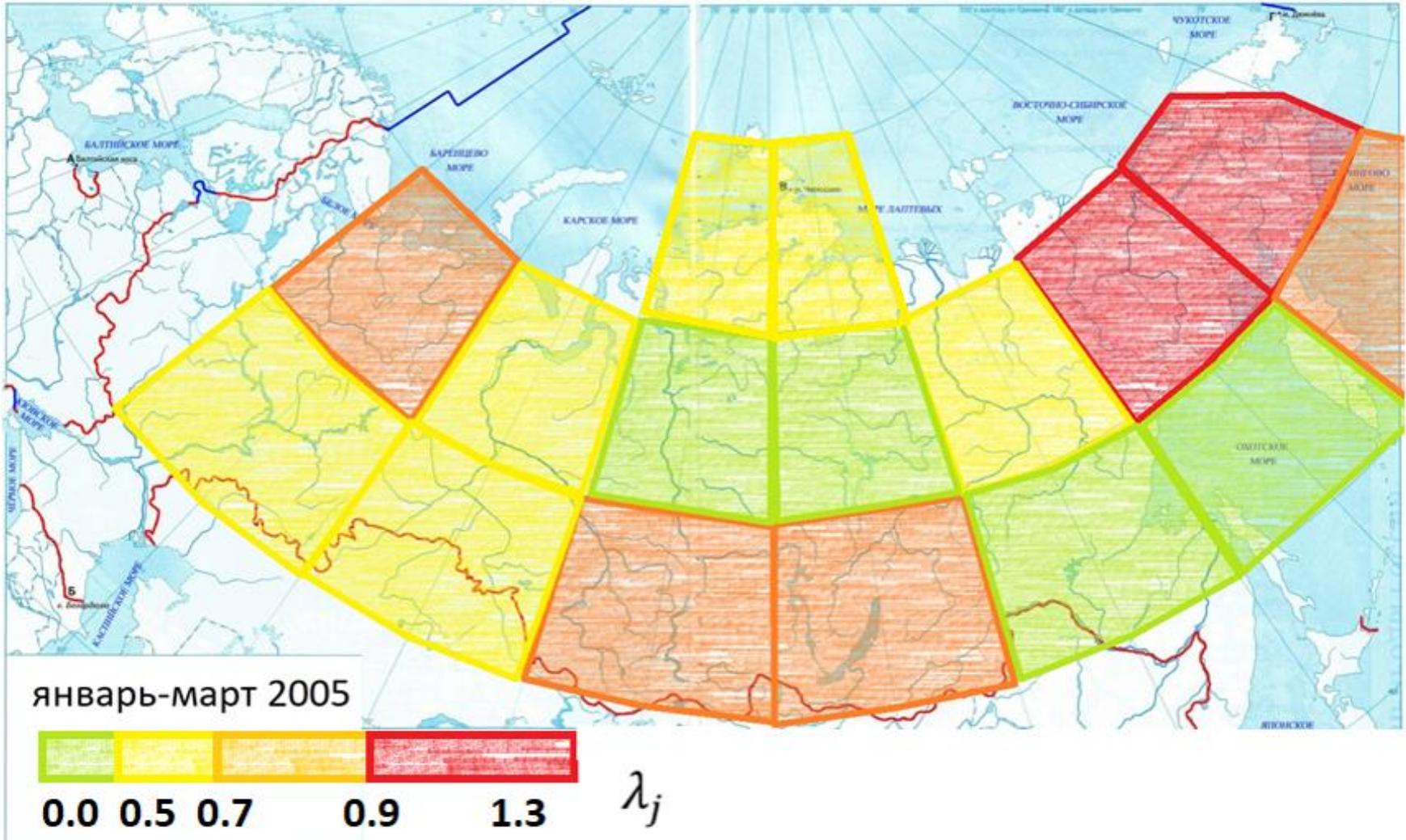
- для момента времени t_i :

$S_i = \sum_{j=1}^L \varphi_i^j / L$ – среднее по подобласти значение

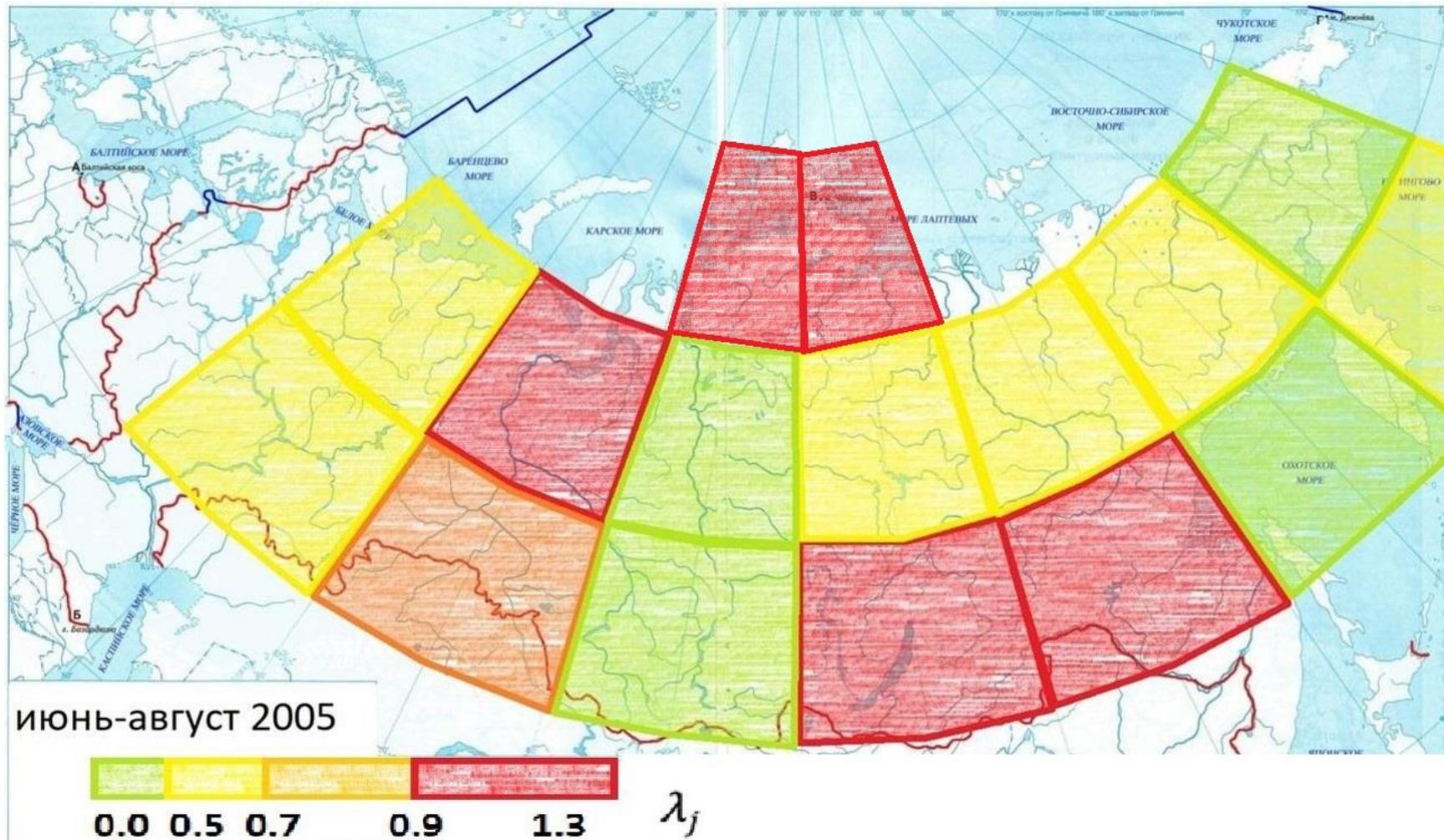
$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^L (\varphi_i^j - S_i)^2 / (L - 1)$$

- ищем для каждой подобласти: $\lambda_j = \frac{|\varphi_i - S_i|}{\sigma}$

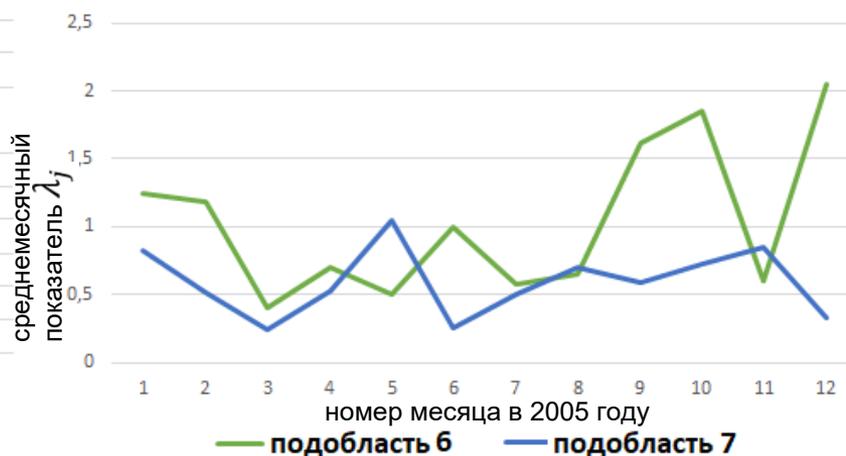
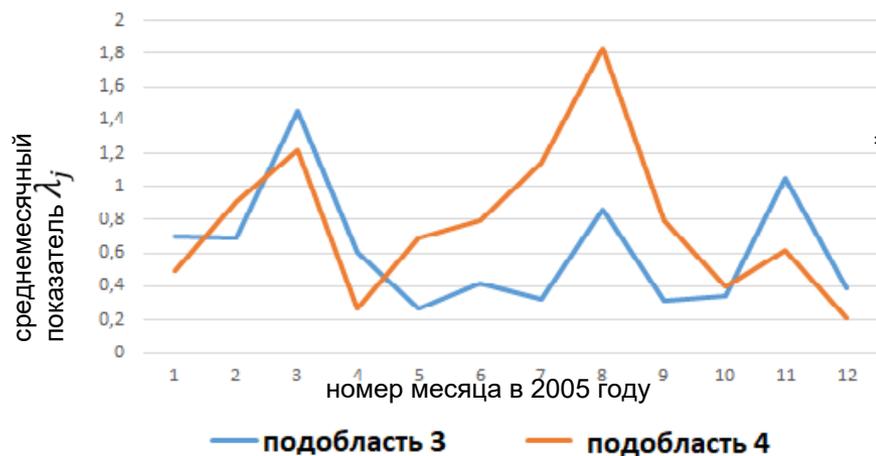
Зима 2005



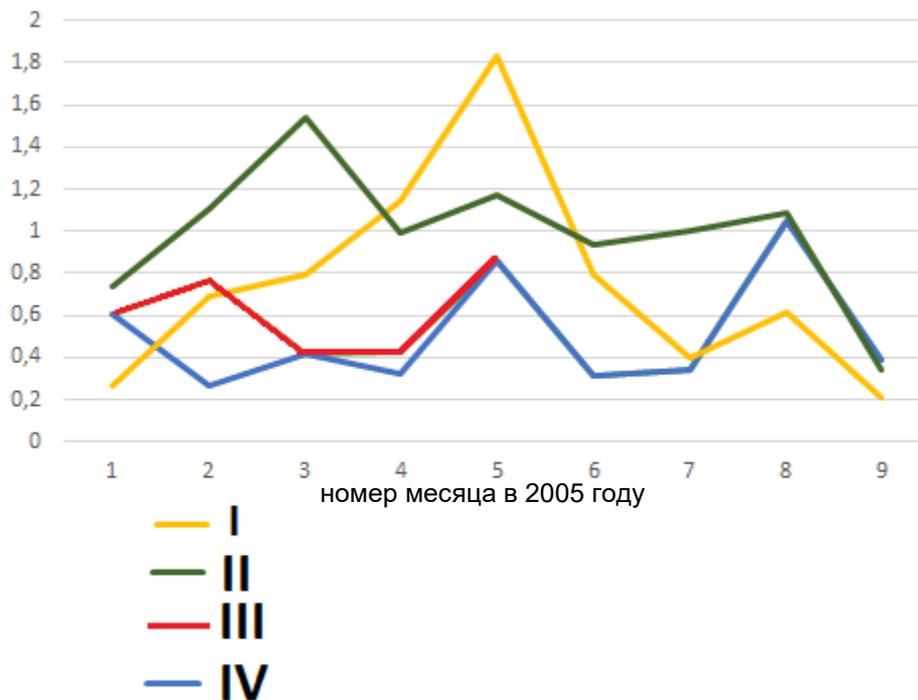
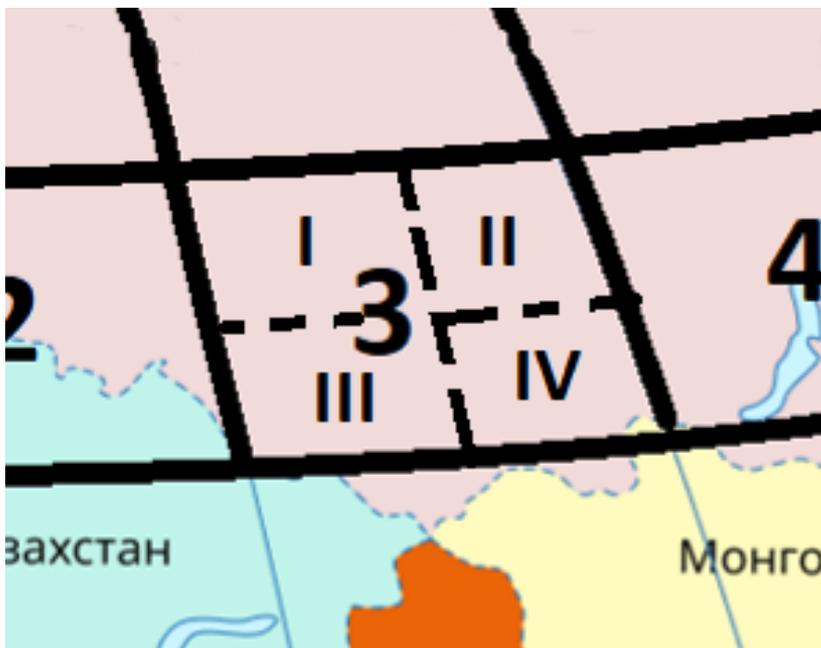
лето 2005



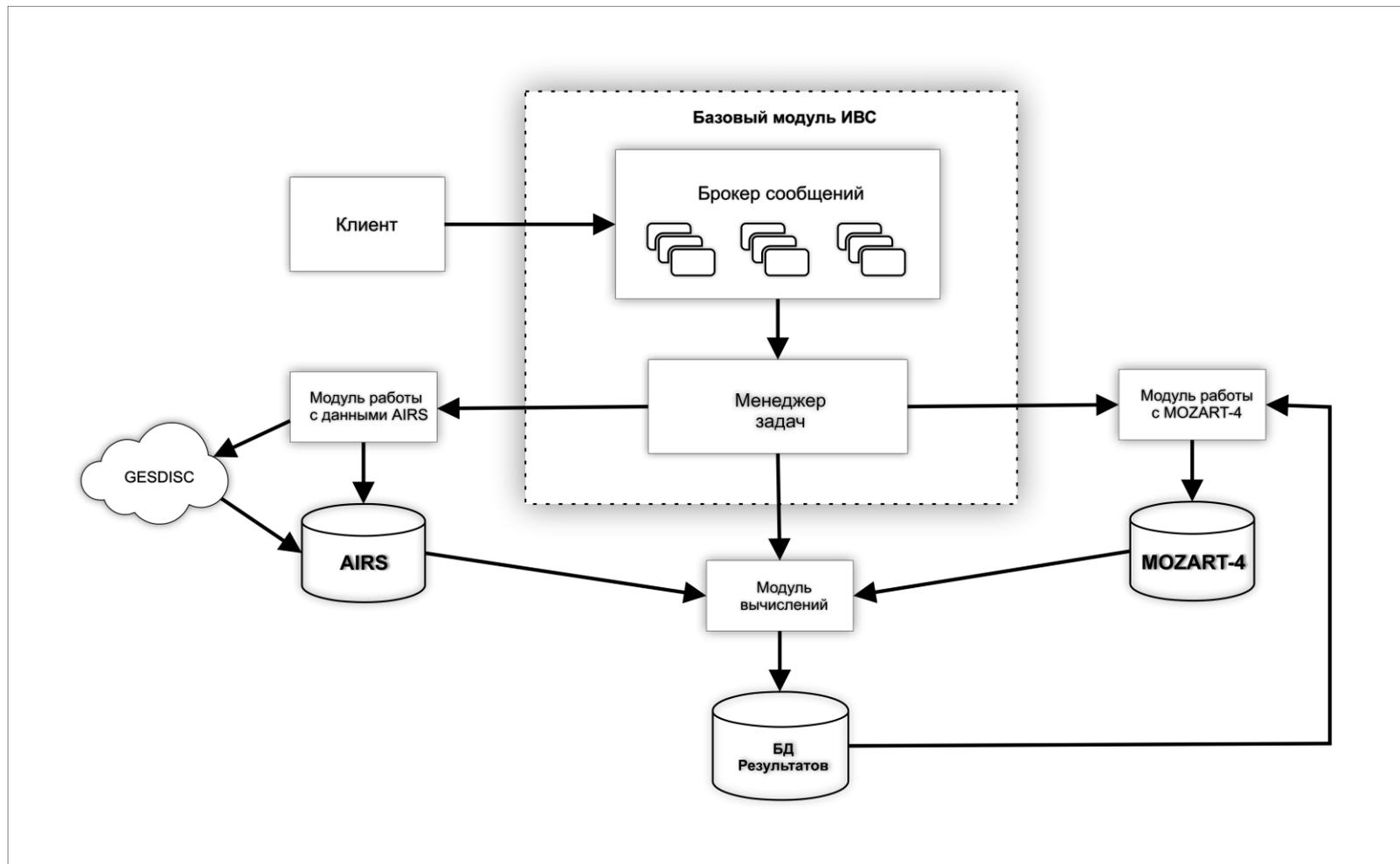
Численные эксперименты с реальными данными (по месяцам за 2005 год)



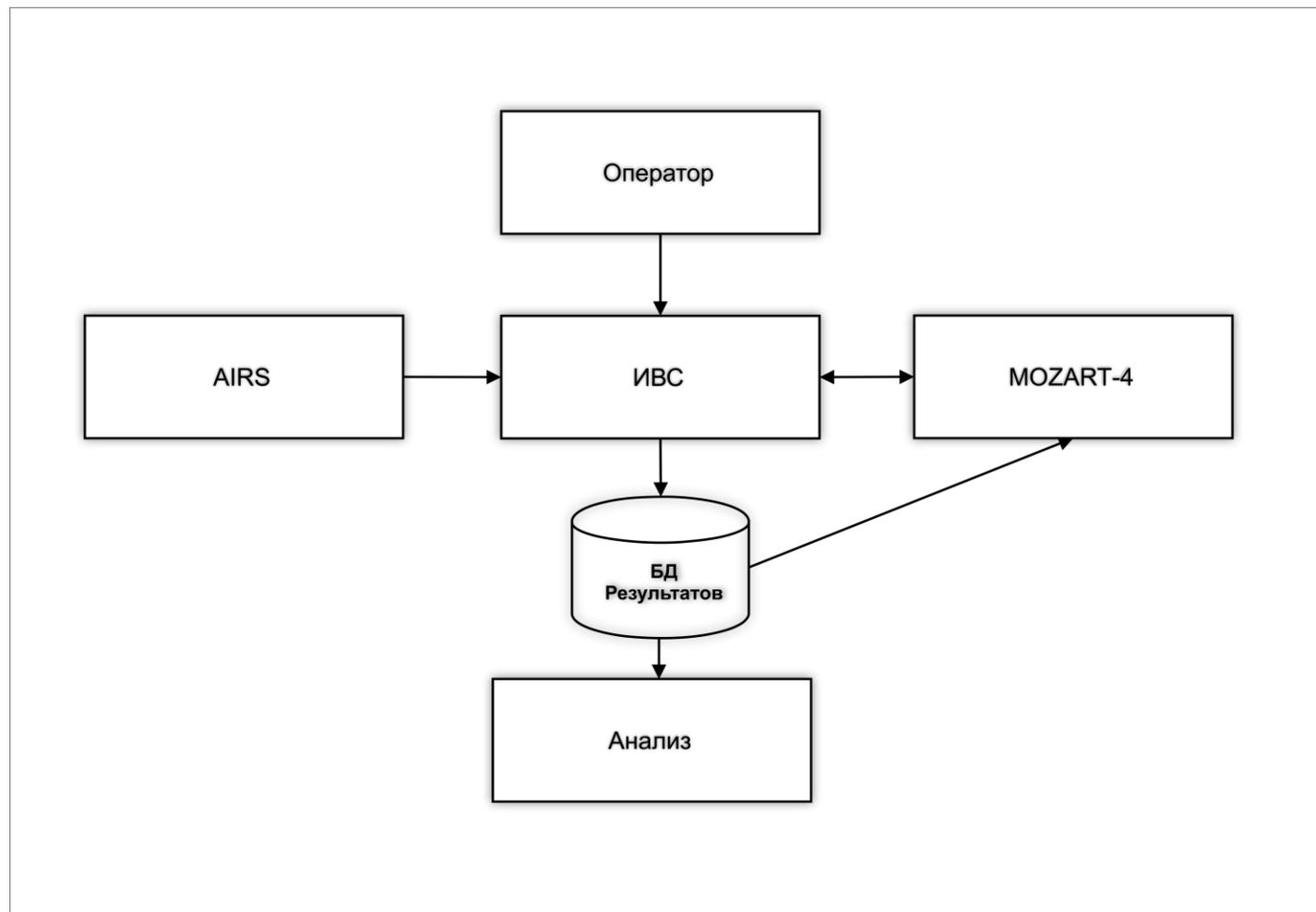
Регион №3 (Сибирь)



Вычислительная система усвоения данных



Вычислительная система усвоения данных



Заключение

- Задача оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений в настоящее время решается с помощью систем усвоения данных.
- Представлен алгоритм оценки потоков парниковых газов с поверхности Земли по спутниковым данным и математической модели.
- Алгоритм представляет собой первый этап разработки системы усвоения данных, полученные результаты можно считать качественной сравнительной оценкой потоков метана для различных регионов.

Спасибо за внимание!