

Чувствительность показаний спутникового гиперспектрометра ИК-диапазона к вариациям характеристик газового состава атмосферы

Мордвин Е.Ю.⁽¹⁾, Лагутин А.А.^{(1),(2)}, Сармисоков З.Т.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Алтайский государственный университет, г. Барнаул

⁽²⁾ Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Актуальность работы

При разработке новых гиперспектральных приборов ИК-диапазона космического базирования и алгоритмов восстановления геофизических параметров системы «атмосфера-подстилающая поверхность» по получаемыми этими приборами данным решаются как прямые задачи, позволяющий устанавливать связи между показаниями каналов спутникового прибора и характеристиками системы, так и задачи чувствительности показаний прибора к вариациям ее характеристик.

Цели и задачи

Цель

Исследование чувствительности показания спутникового гиперспектрометра ИК-диапазона к вариациям газового состава атмосферы.

Задачи

1. Развитие подхода к исследованию влияний вариаций характеристик атмосферы на показания каналов гиперспектрального спутникового прибора ИК-диапазона, основанного на функциональной (вариационной) теории чувствительности.
2. Расчет коэффициентов дифференциальной чувствительности прибора к вариациям газового состава атмосферы.
3. Проведение тестовых расчетов коэффициентов чувствительности спектральных каналов гиперспектрометра AIRS спутника Aqua, используемых для восстановления профиля содержания метана, с использованием пакета LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model)

Интенсивность уходящего длинноволнового излучения

$$L_\nu(0, z; \theta) = \varepsilon(\nu)B_\nu[T_s(0)]P_\nu(0, z; \theta) + \int_0^z B_\nu[T(z')] \frac{dP_\nu(z', z; \theta)}{dz'} dz',$$

где:

T_s и $\varepsilon(\nu)$ – температура и коэффициент излучения подстилающей поверхности;

$B_\nu[T(z')]$ – функция Планка;

$P_\nu(z', z; \theta)$ – функция пропускания излучения с частотой ν на трассе уровень атмосферы z' и уровень z (спутника).

Функция пропускания атмосферы:

$$P_\nu(z_1, z_2; \theta) = \prod_l \exp \left[-\sec\theta \int_{z_2}^{z_1} k_l(\nu, z') \rho_l(z') dz' \right],$$

где $k_l(\nu, z')$ – массовый коэффициент поглощения газовой компонентой l излучения на частоте ν в единичном интервале около z' ,

$\rho_l(z')$ – плотность этого газа в этом слое.

Вариационная производная

Вариация функционала $L(X)$:

$$\Delta L(X \rightarrow X') = L(X') - L(X).$$

Пусть $u(x)$ – некоторая функция, характеризующая состояние системы, тогда

$$\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u'(\cdot)) = L(u'(\cdot)) - L(u(\cdot)).$$

Полагая, что $u'(x) = u(x) + \Delta u(x)$, получим:

$$\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u(\cdot) + \Delta u(\cdot)) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n!} \right) \int dx_1 \dots \int dx_n \times \\ \times L^{(n)}(x_1, \dots, x_n, u(\cdot)) \Delta u(x_1) \dots \Delta u(x_n),$$

где

$$L^{(n)}(x_1, \dots, x_n, u(\cdot)) = \frac{\delta L^n(u(\cdot))}{\delta u(x_1) dx_1 \dots \delta u(x_n) dx_n}.$$

Коэффициент дифференциальной чувствительности

Линейное приближение:

$$\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u(\cdot) + \Delta u(\cdot)) \approx \int L^{(1)}(x, u(\cdot)) \Delta u(x) dx = \int \frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x) dx} \Delta u(x) dx,$$

$\frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x) dx}$ — коэффициент дифференциальной чувствительности.

Относительное изменение показания в процентах

$$S = \frac{\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u(\cdot) + \Delta u(\cdot))}{L(u(\cdot))} = \frac{1}{L(u(\cdot))} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x) dx} \Delta u(x) dx,$$

тогда

$$S = \frac{u(x_1)}{L} \frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x_1) dx_1}.$$

Значение функции S следует интерпретировать как изменение L в процентах, обусловленной изменением u в единичном интервале около x_1 на 1%.

Чувствительность показания спутникового ИК-зондировщика

Вариационная производная $L_\nu(0, z; \theta)$:

$$\frac{\delta L_\nu}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} = \varepsilon(\nu) B_\nu [T_s(0)] \frac{P_\nu(0, z; \theta)}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} + \int_0^z B_\nu [T(z')] \frac{d}{dz'} \left[\frac{dP_\nu(z', z; \theta)}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} \right] dz'.$$

После преобразования:

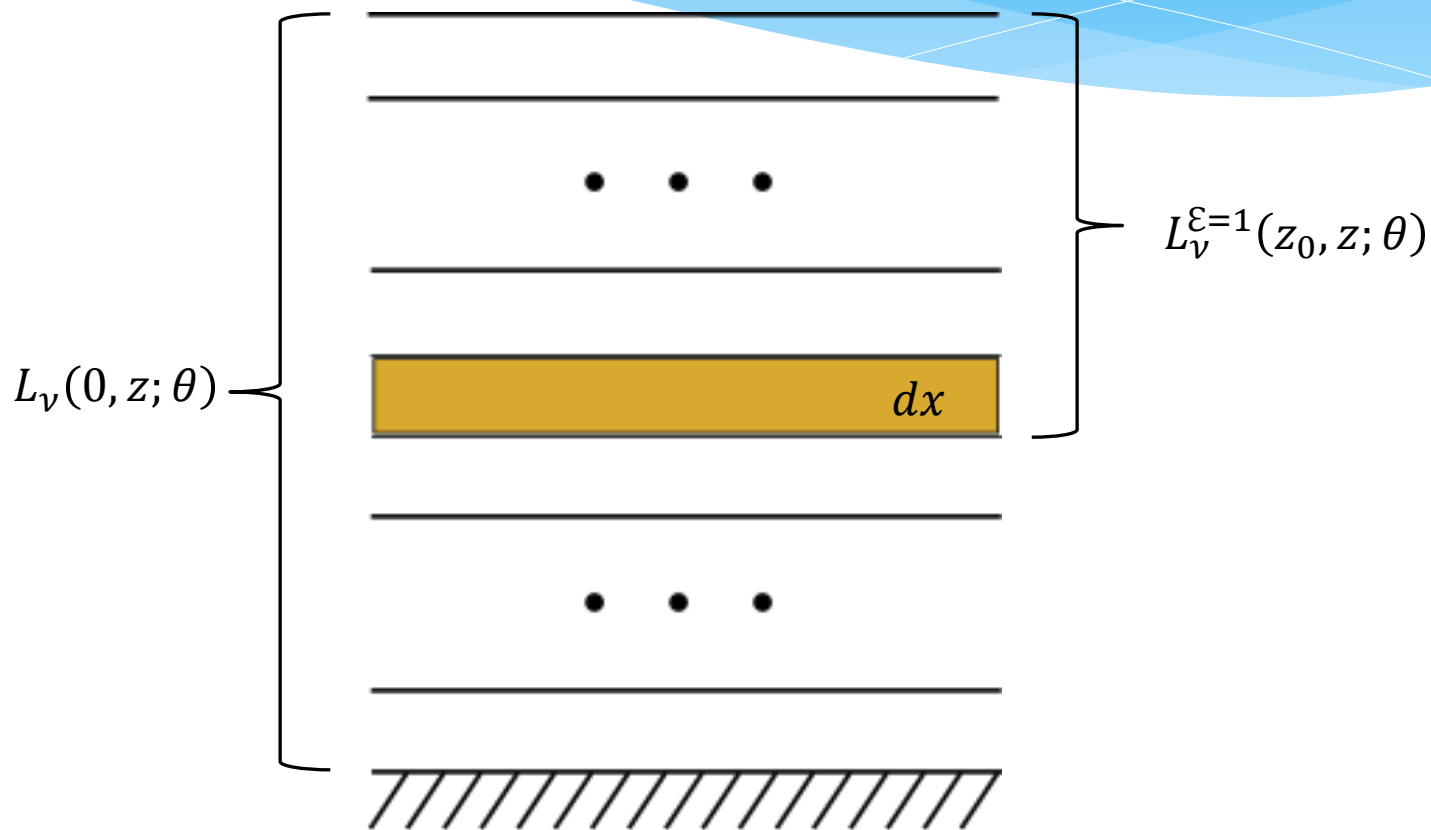
$$\frac{\delta L_\nu}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} = -(\sec \theta) k_l(\nu, z_0) [L_\nu(0, z; \theta) - L_\nu^{\varepsilon=1}(z_0, z; \theta)],$$

где $k_l(\nu, z_0)$ - массовый коэффициент поглощения излучения на частоте ν газа l в единичном интервале около уровня z ;

$$U = L_\nu(0, z; \theta) - L_\nu^{\varepsilon=1}(z_0, z; \theta)$$

– универсальная функция, равная разности интенсивностей уходящего излучения для невозмущенной атмосферы.

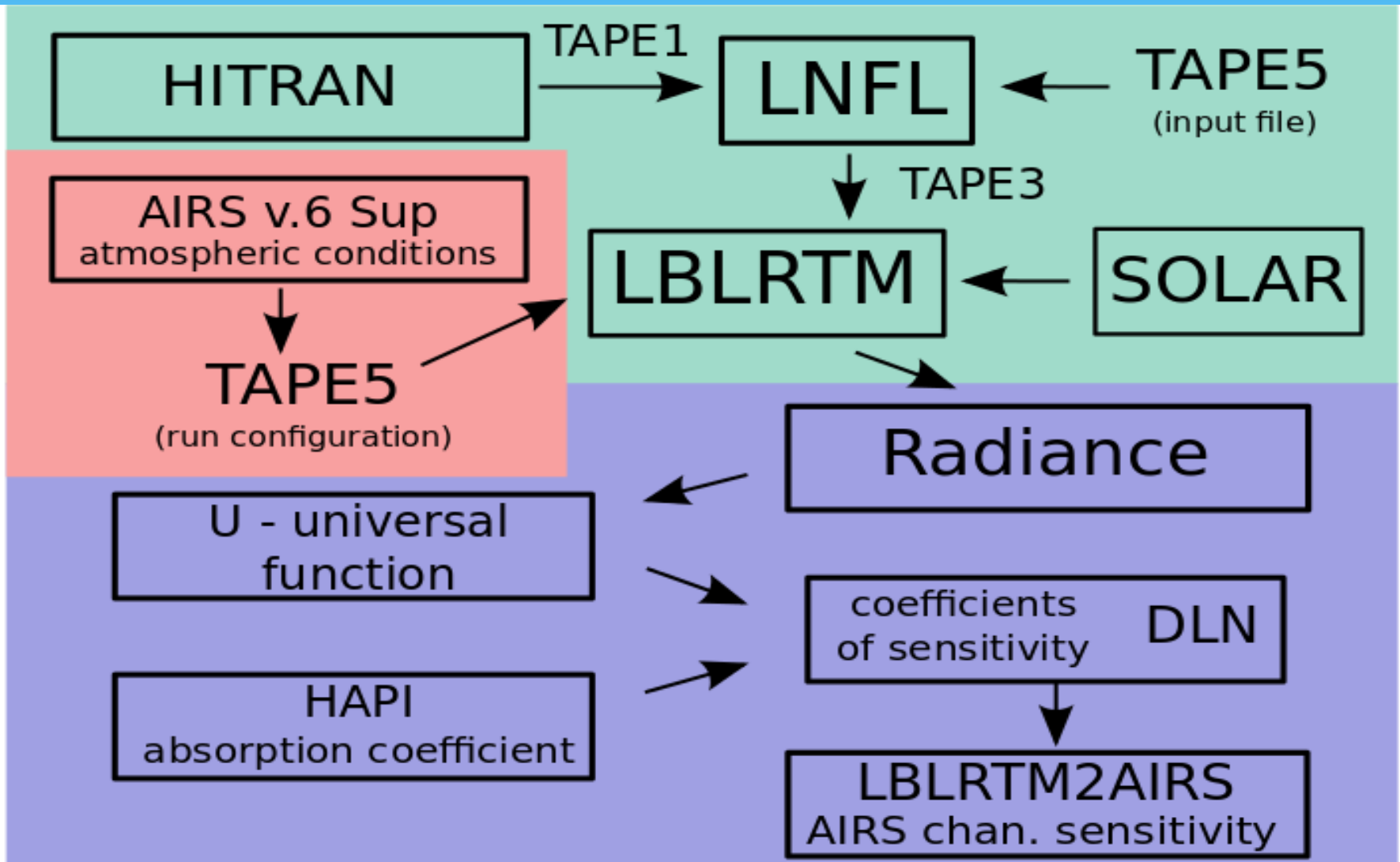
Схема модели атмосферы



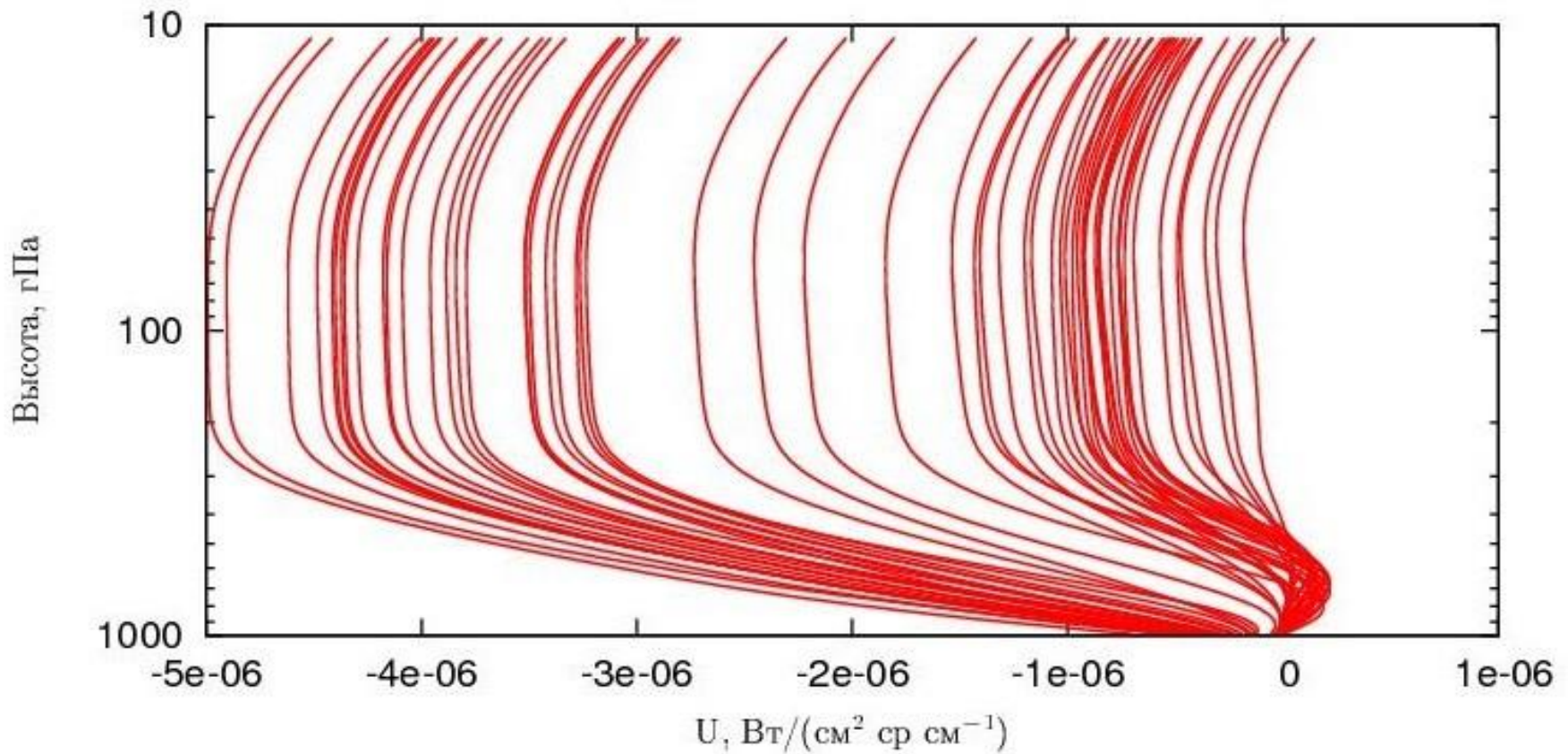
Параметры моделирования

- Среднеширотная летняя ночная атмосфера,
- ~ 100 слоев атмосферы, логарифмическая модель, уровни 0.03 – 1000 гПа (высота ~55 км),
- частотный диапазон 1200-1600 см^{-1} ,
- температура поверхности 297 C° ,
- спектральное разрешение 0.001 см^{-1} ,
- форма линий – профиль Фойгта,
- отсутствие отражения поверхности,
- отсутствие отражения слоев атмосферы,
- геометрия наблюдения – надир,
- 16 газовых компонентов,
- NAPl (NITRAN application program interface) для расчета массового коэф. поглощения.

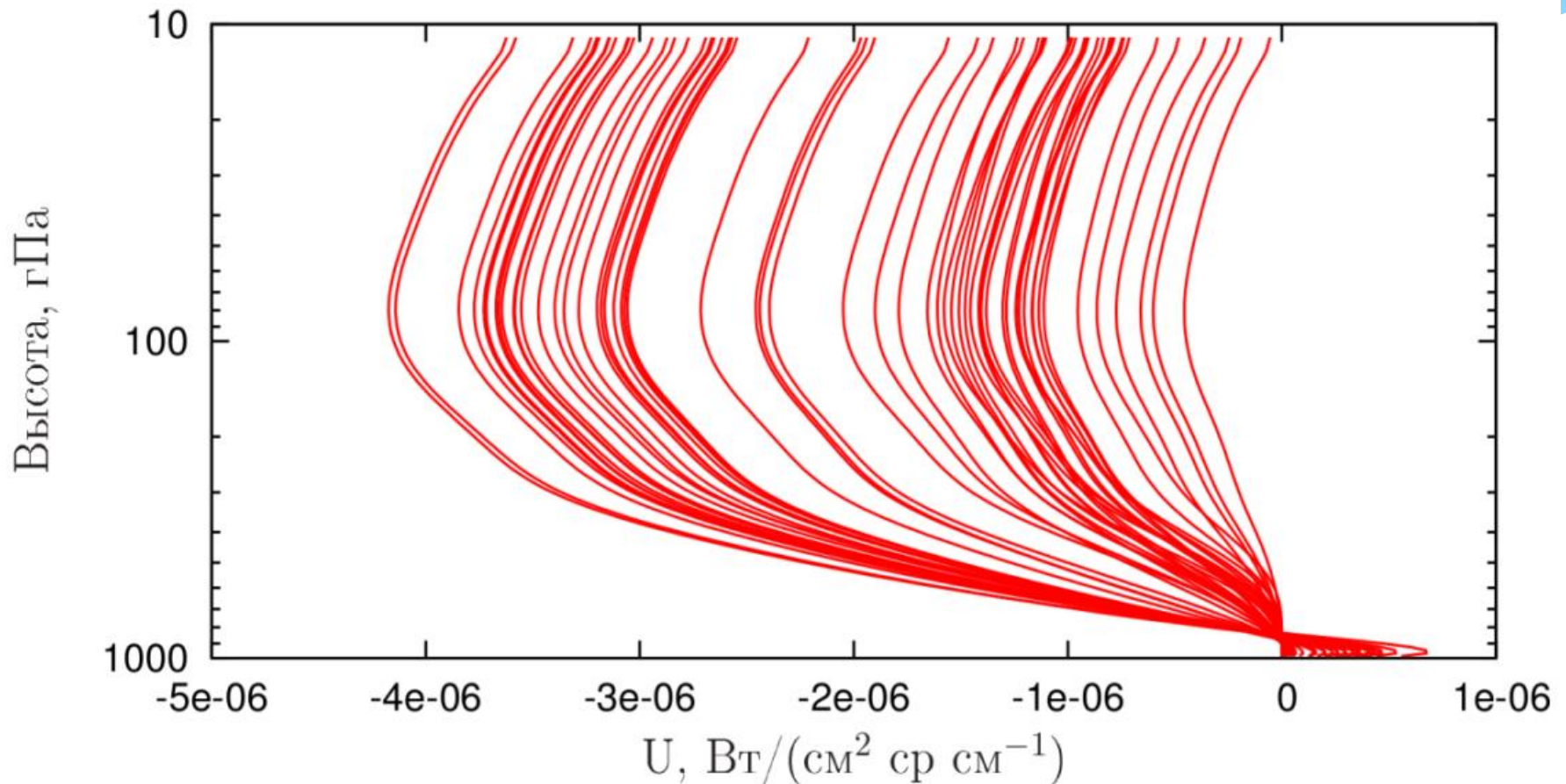
Вычислительный комплекс расчета чувствительности показаний AIRS/Aqua



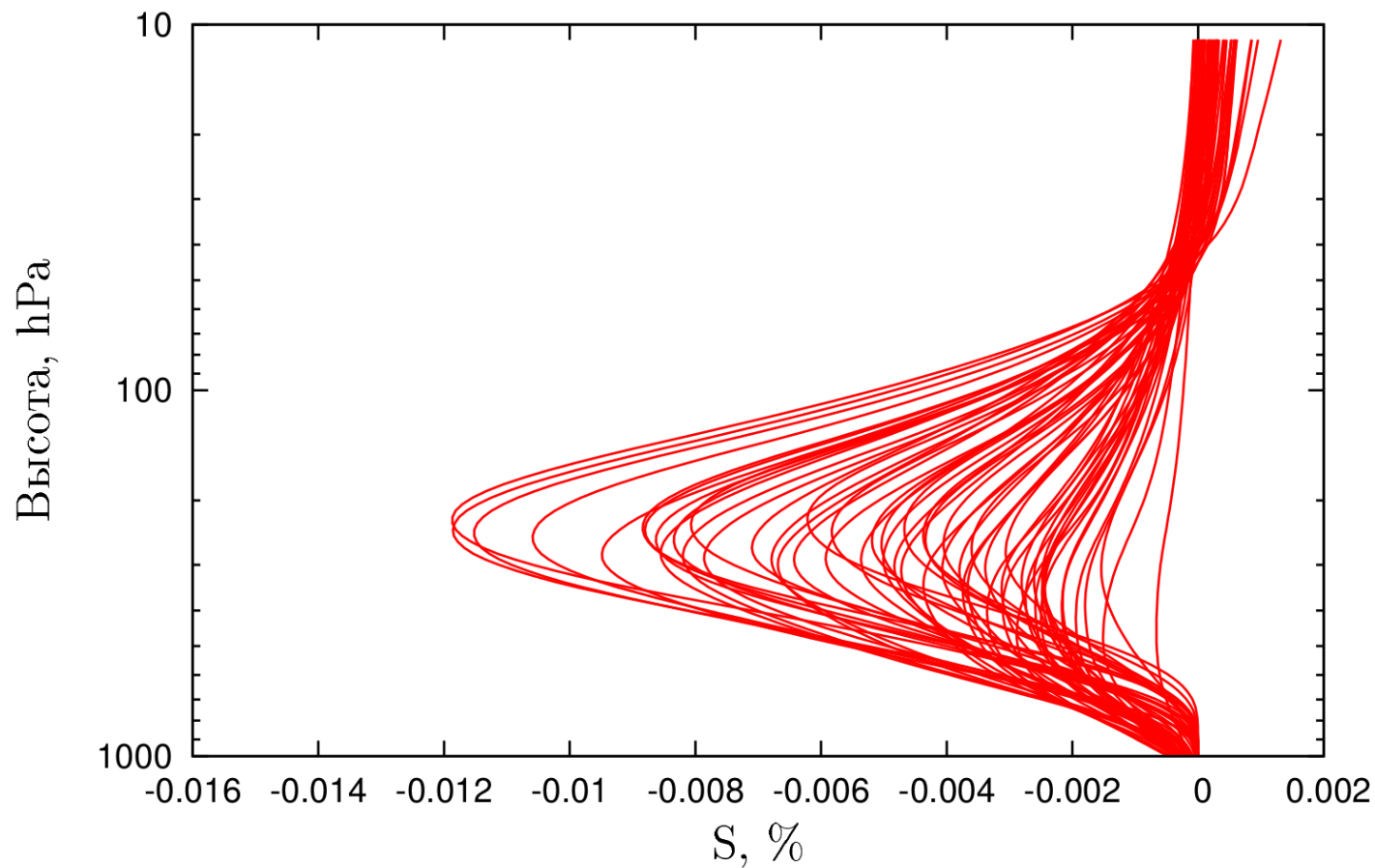
Универсальная функция U для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS, используемых для восстановления профиля содержания метана, в летней субарктической атмосфере



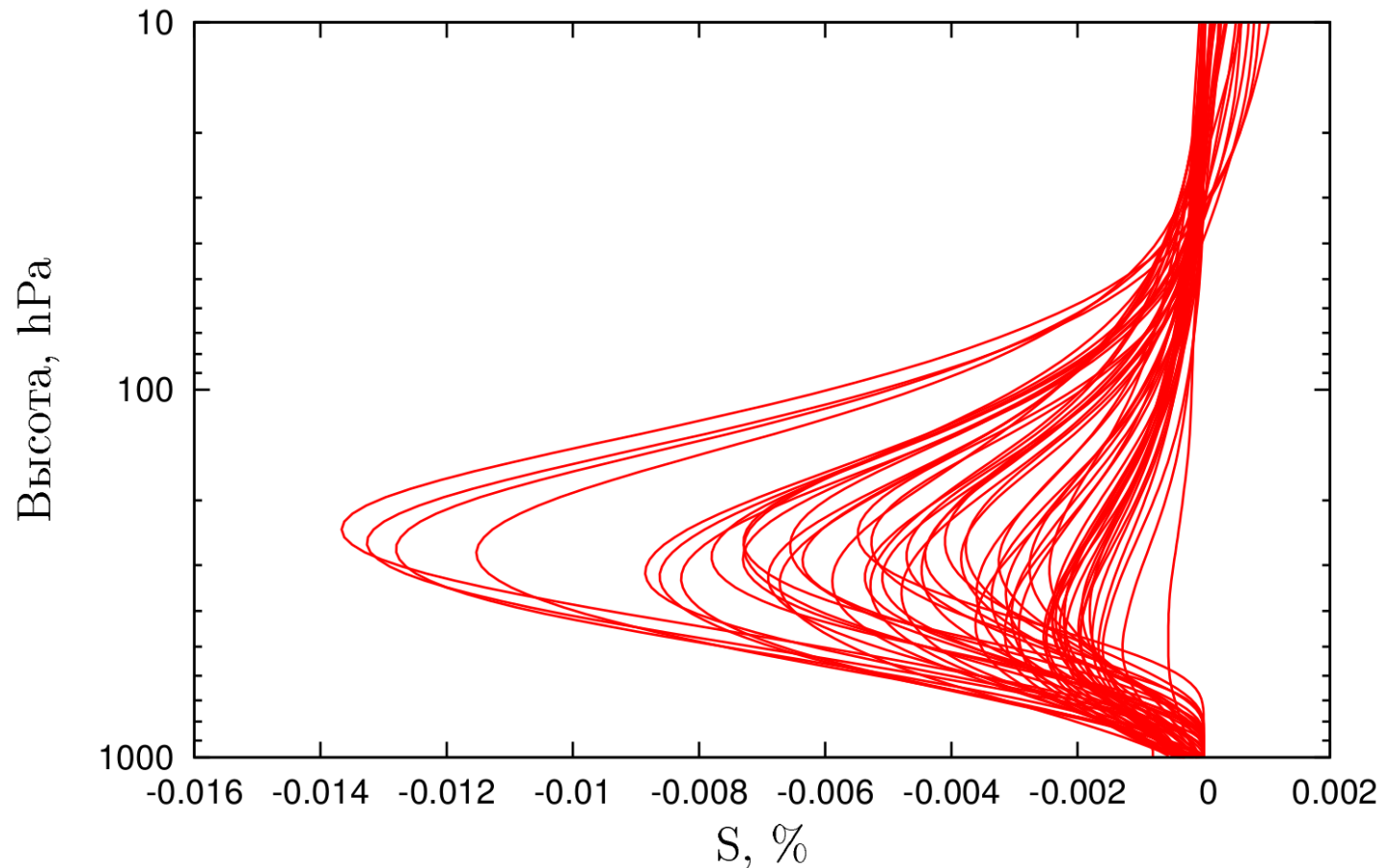
Универсальная функция U для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS, используемых для восстановления профиля содержания метана, в летней среднеширотной атмосфере



Относительное изменение S показаний каналов AIRS/Aqua, обусловленное изменением плотности метана на 1 % в слое 1 км около z , полученное стандартным методом



Относительное изменение S показаний каналов AIRS/Aqua, обусловленное изменением плотности метана на 1 % в слое 1 км около z , полученное методом функциональных производных



Выводы

1. Предложен новый метод расчета коэффициентов дифференциальной чувствительности показаний спутникового ИК-зондировщика к вариациям характеристик атмосферы.
2. Показано, что коэффициент дифференциальной чувствительности показаний каналов прибора к вариациям плотности исследуемого газа выражается через массовый коэффициент поглощения этого газа и универсальную функцию, определяемую интенсивностями уходящего излучения для невозмущенной атмосферы.
3. Представлены численные значения универсальной функции для гиперспектрометра AIRS/Aqua, полученные с использованием созданного на базе кода LBLRTM вычислительного комплекса.
4. Проведены расчеты относительного изменения показаний каналов гиперспектрометра AIRS/Aqua, обусловленное изменением плотности метана на 1 % в слое 1 км около уровня z атмосферы.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!