

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

**Мордвин Е.Ю.<sup>(1)</sup>, Лагутин А.А.<sup>(1),(2)</sup>, Сармисоков З.Т.<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Алтайский государственный университет, г. Барнаул

<sup>(2)</sup> 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  $\nu$  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  $\nu$  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:

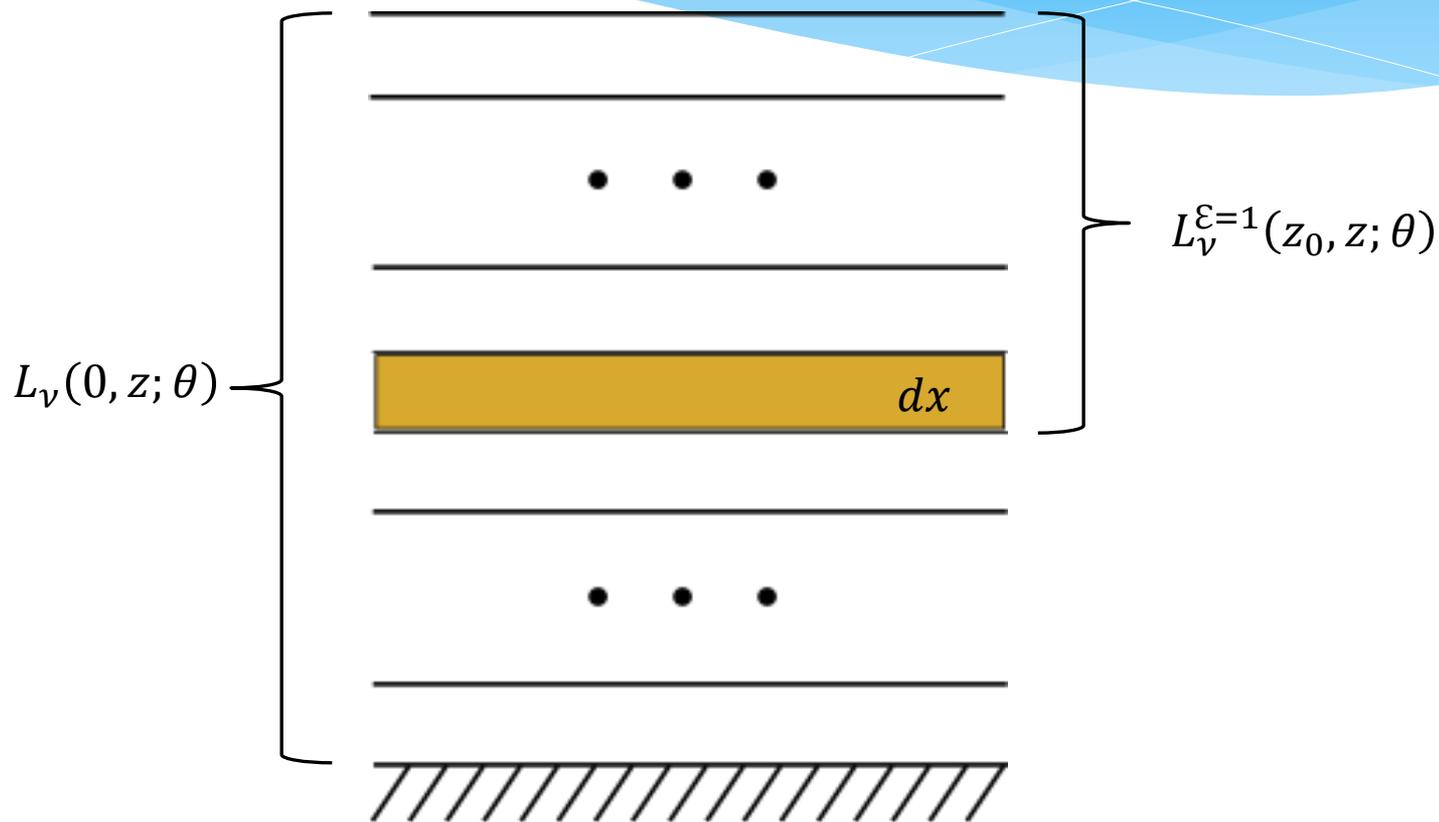
$$\frac{\delta L_\nu}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} = -(\sec \theta) k_l(\nu, z_0) [L_\nu(0, z; \theta) - L_\nu^{\varepsilon=1}(z_0, z; \theta)],$$

где  $k_l(\nu, z_0)$  - массовый коэффициент поглощения излучения на частоте  $\nu$  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.

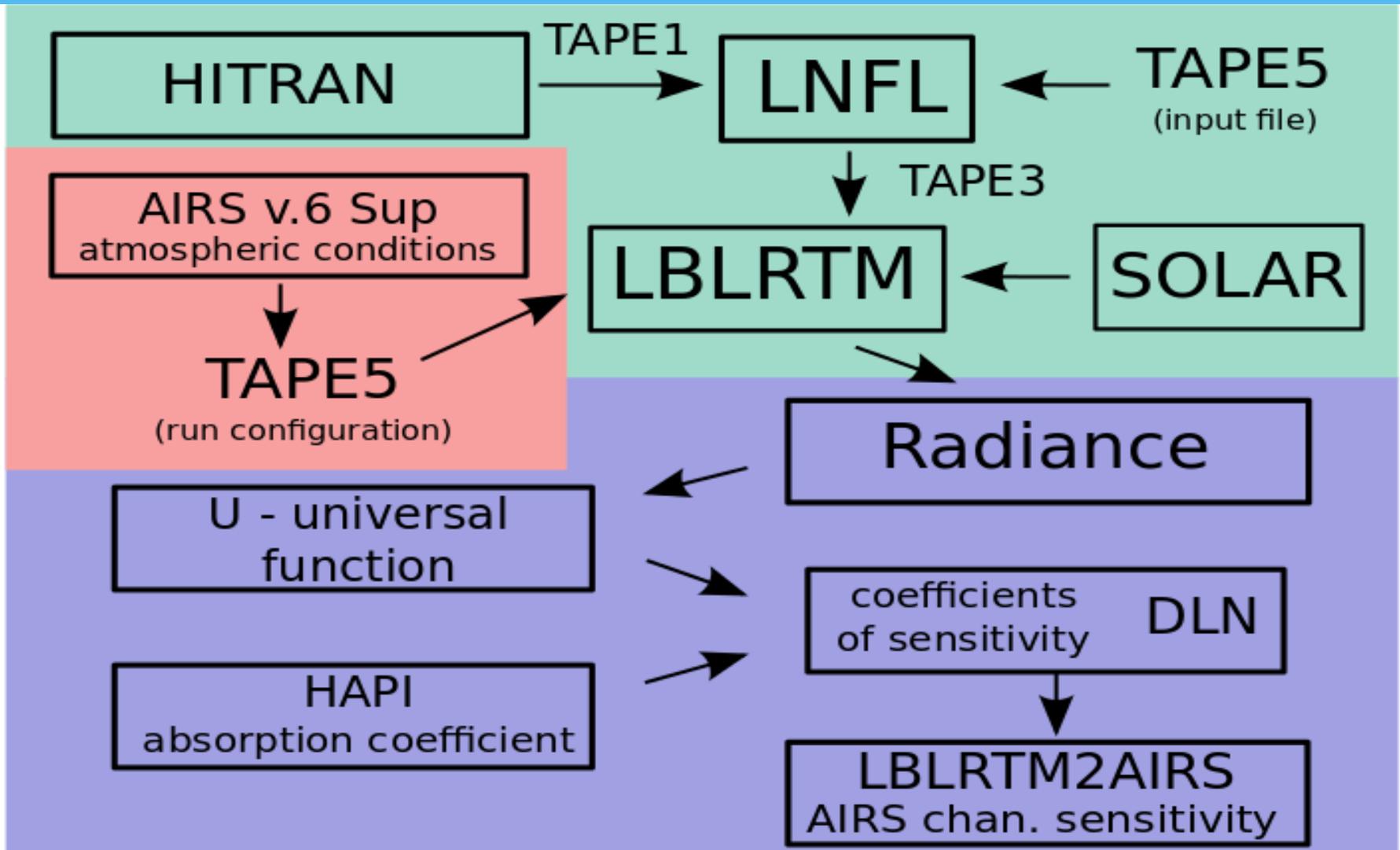
# Схема модели атмосферы



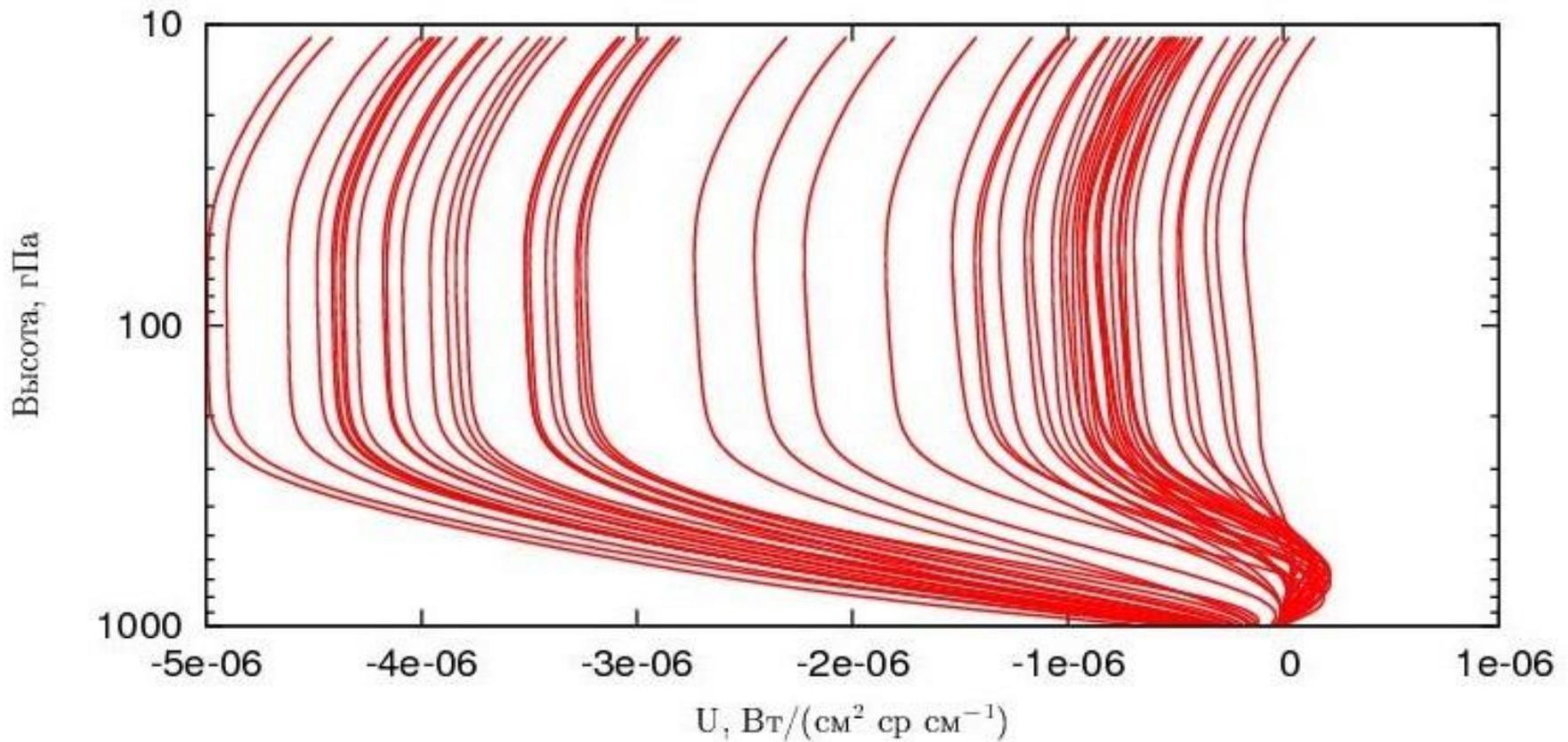
# Параметры моделирования

- Среднеширотная летняя ночная атмосфера,
- ~ 100 слоев атмосферы, логарифмическая модель, уровни 0.03 – 1000 гПа (высота ~55 км),
- частотный диапазон 1200-1600  $\text{см}^{-1}$ ,
- температура поверхности 297  $\text{C}^\circ$ ,
- спектральное разрешение 0.001  $\text{см}^{-1}$ ,
- 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.

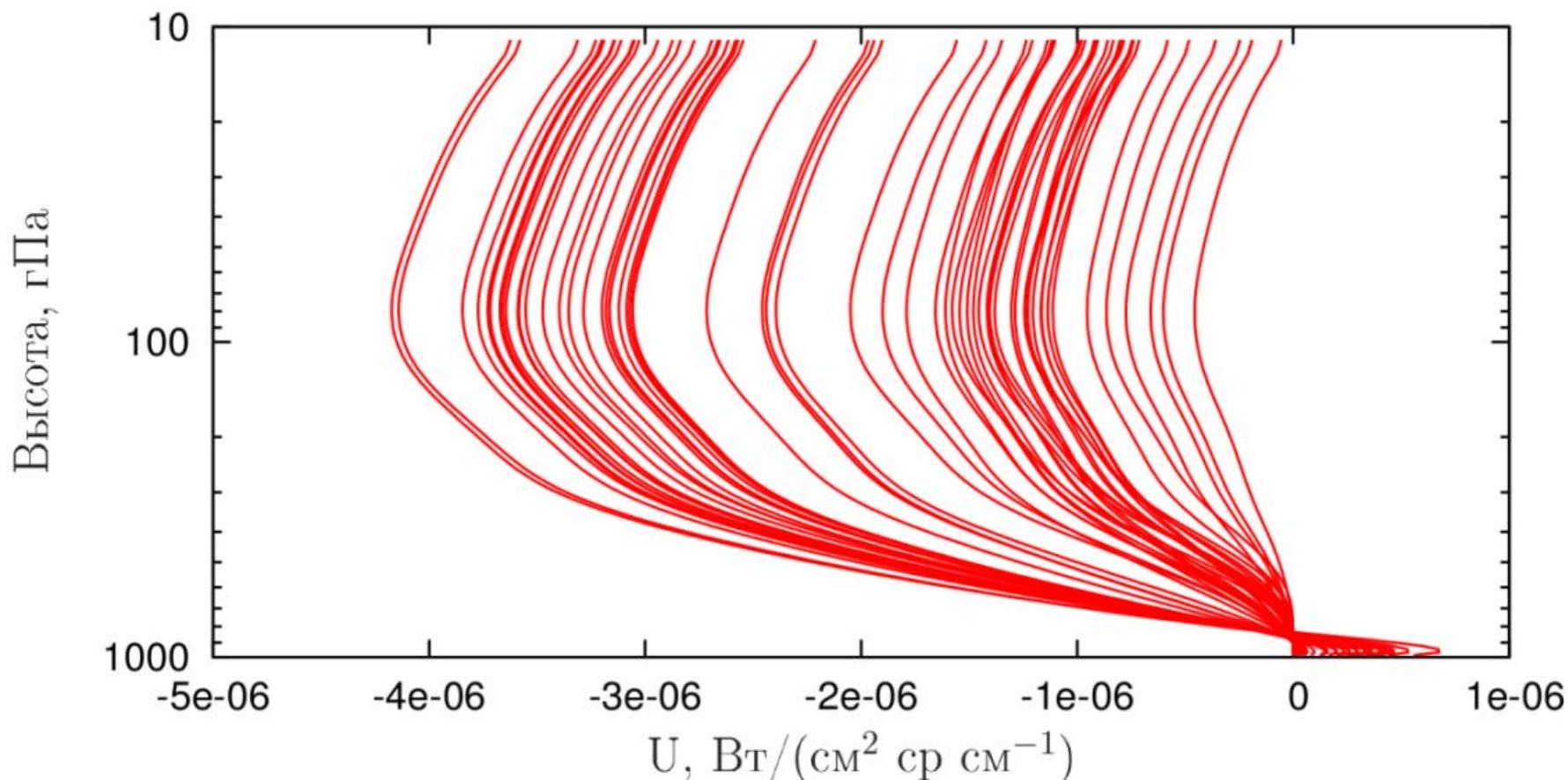
# Вычислительный комплекс расчета чувствительности показаний AIRS/Aqua



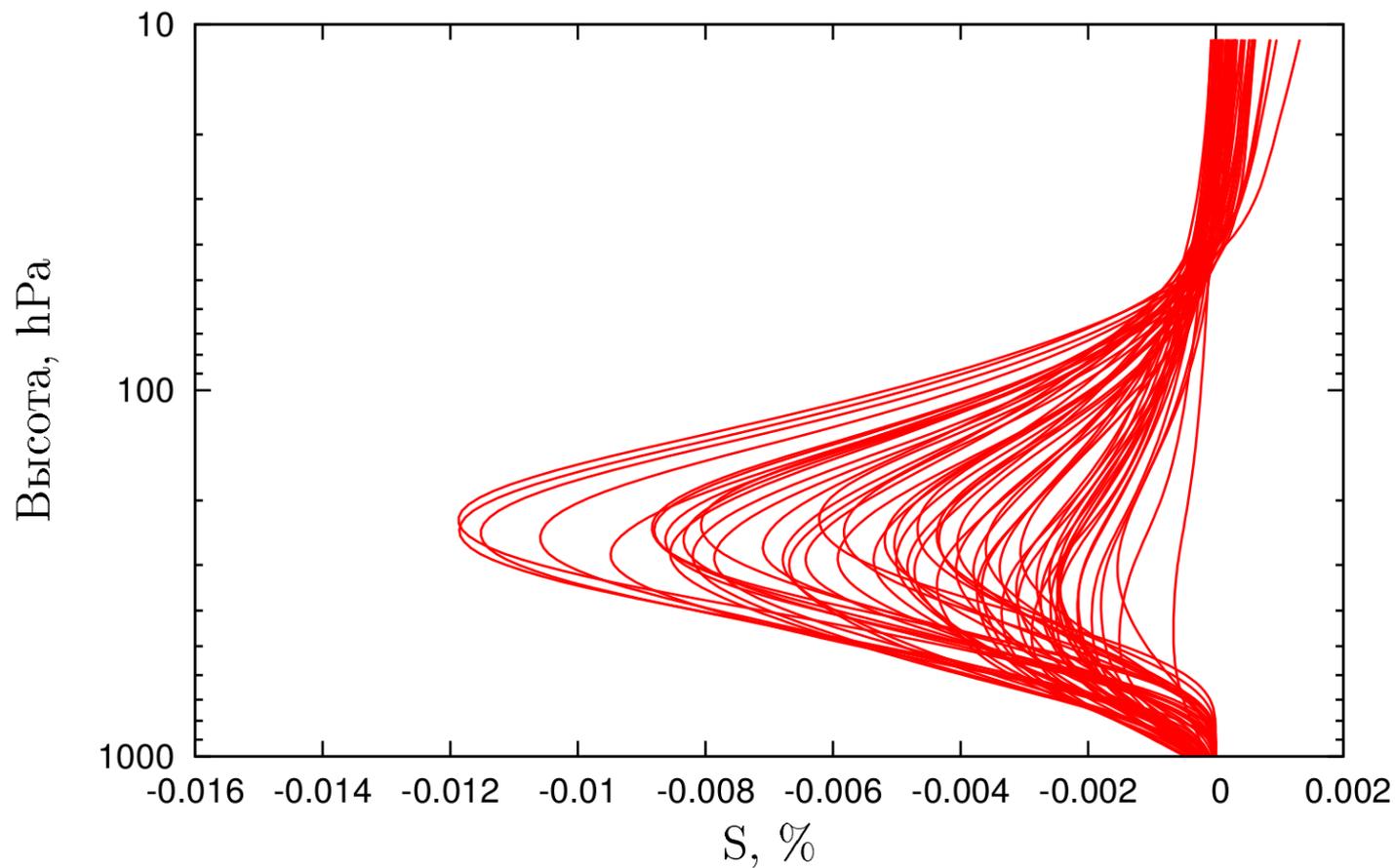
Универсальная функция  $U$  для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS, используемых для восстановления профиля содержания метана, в летней субарктической атмосфере



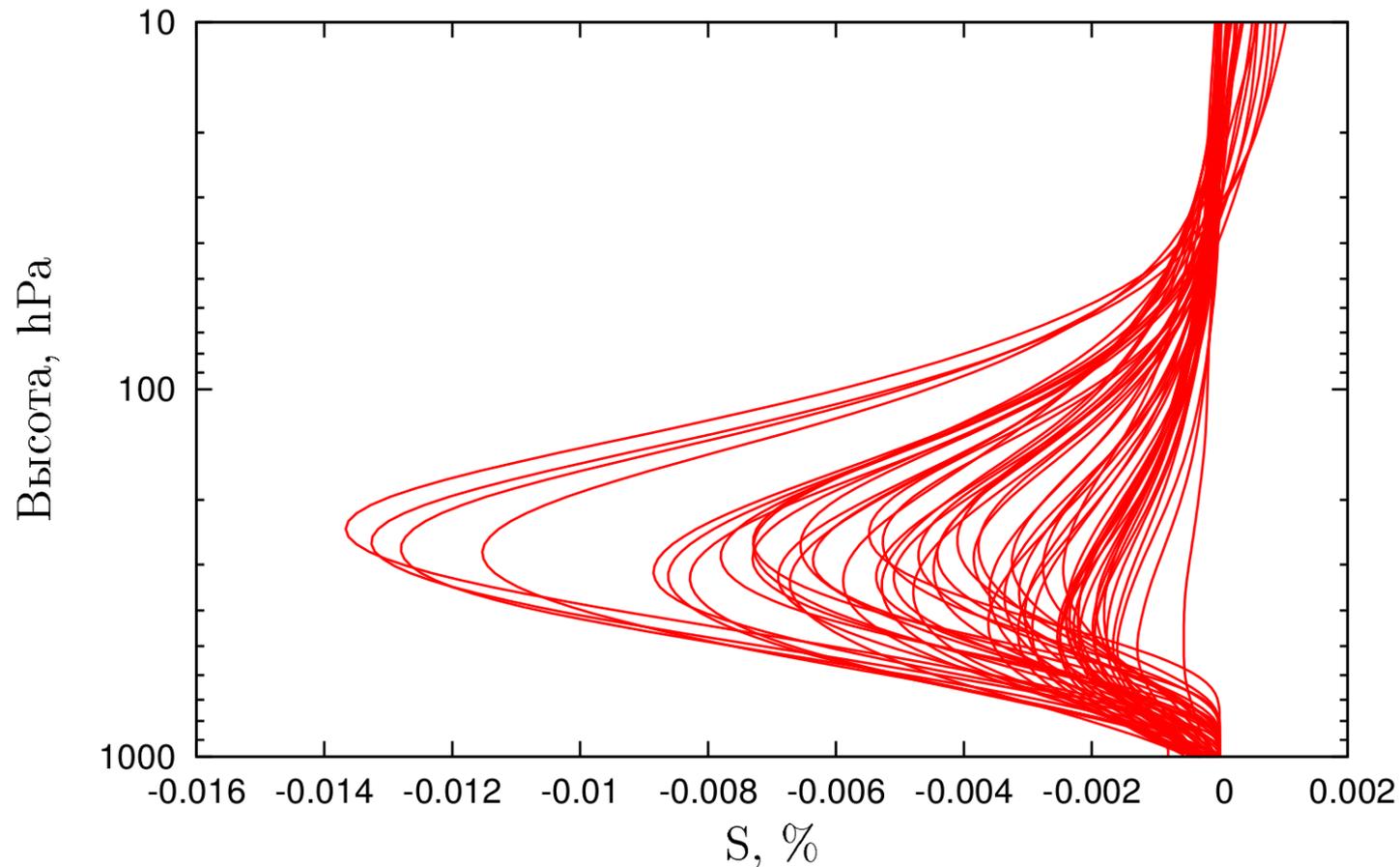
Универсальная функция  $U$  для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS, используемых для восстановления профиля содержания метана, в летней среднеширотной атмосфере



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!**