

# SENSITIVITY OF THE SATELLITE IR-HYPERSPECTROMETER READINGS TO VARIATIONS OF THE ATMOSPHERIC GAS COMPOSITION CHARACTERISTICS

*Egor Yu Mordvin*<sup>1</sup>, *Anatoly A. Lagutin*<sup>1,2</sup>, *Zohir T. Sarmisokov*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Altai State University, Barnaul, Russia

<sup>2</sup>Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

## **Abstract**

We discuss the application of a functional sensitivity theory to the problem of calculating of how the satellite IR-hyperspectrometer readings respond to variations in atmospheric gas composition. The differential sensitivity coefficients of the instrument channels readings are introduced, and their relation to the variations of functional under investigation is shown. Expressions of differential sensitivity coefficients of the instrument channels readings to variations in the density of the gas being studied have been obtained.

*Keywords: coefficients of differential sensitivity, variation of atmospheric gas composition, IR-hyperspectrometer readings, universal function*

# 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, Барнаул

<sup>2</sup> Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск

Обсуждается применение функциональной теории чувствительности к решению задачи расчета отклика показаний спутникового гиперспектрометра ИК-диапазона к вариациям газового состава атмосферы. Вводятся коэффициенты дифференциальной чувствительности показаний каналов прибора, показана их связь с вариациями исследуемого функционала. Получены выражения для коэффициентов дифференциальной чувствительности показаний каналов прибора к вариациям плотности исследуемого газа.

*Ключевые слова:* коэффициенты дифференциальной чувствительности, вариация газового состава атмосферы, показания гиперспектрометра ИК-диапазона, универсальная функция

**Введение.** Исследование чувствительности показаний гиперспектральных приборов ИК-диапазона космического базирования к вариациям характеристик системы «атмосфера - подстилающая поверхность» является обязательным этапом при разработке новых сенсоров. Расчеты проводятся с использованием уравнения, описывающего зависимость интенсивности уходящего длинноволнового излучения частоты  $\nu$  на верхней границе  $z$  безоблачной нерассеивающей атмосферы  $L_\nu(0, z; \theta)$  от характеристик атмосферы и подстилающей поверхности (ПП). Без учета вкладов солнечного излучения и процессов перерассеяния подстилающей поверхностью нисходящего излучения это уравнение в модели плоско-параллельной атмосферы может быть записано в виде [1]

$$L_\nu(0, z; \theta) = \varepsilon(\nu)B_\nu[T_s(0)]P_\nu(0, z; \theta) + \int_0^z B_\nu[T(z')] \frac{dP_\nu(z', z; \theta)}{dz'} dz'. \quad (1)$$

Здесь  $T_s$  и  $\varepsilon(\nu)$  есть температура и коэффициент излучения ПП, соответственно;  $B_\nu[T_s(0)]$  – функция Планка;  $P_\nu(0, z; \theta)$  – функция пропускания атмосферой излучения с частотой  $\nu$  на трассе «уровень атмосферы  $z'$  – спутник», а  $\theta$  – зенитный угол.

Функция пропускания  $P_\nu(z_1, z_2; \theta)$ , входящая в каждое слагаемое (1), характеризует степень прозрачности атмосферы для излучения частоты  $\nu$  при его прохождении от уровня генерации до спутника. Значение  $P_\nu$  определяется оптической толщиной на частоте  $\nu$  каждой газовой компоненты  $l$  атмосферы:

$$P_\nu(z_1, z_2; \theta) = \prod_l \exp \left[ -\sec\theta \int_{z_2}^{z_1} \kappa_l(\nu, z') \rho_l(z') dz' \right]. \quad (2)$$

В этом выражении  $\kappa_l(\nu, z)$  есть массовый коэффициент поглощения газовой компонентой  $l$  излучения на частоте  $\nu$ , а  $\rho_l(z)$  – плотность этого газа на уровне  $z$ .

Для расчета отклика спутникового прибора в канале с центральной частотой  $\nu_i$  необходимо вычислить интеграл

$$L_i = \int_{\Delta\nu_i} L_\nu(0, z; \theta) \Psi_i(\nu) d\nu,$$

где  $\Psi_i(\nu)$  – нормированная аппаратная функция канала.

Целью данной работы является исследование чувствительности показания спутникового гиперспектрометра ИК-диапазона к вариациям газового состава атмосферы в рамках развитой авторами функциональной теории чувствительности [2,3].

**Функциональная чувствительность.** В результате происходящих в атмосфере физических процессов ее состояние  $X$  может изменяться. Следуя [2,3], будем называть переход из  $X$  в  $X'$  вариацией состояния атмосферы. Вариацию функционала  $L(X)$ ,

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

обусловленную вариацией состояния системы  $X \rightarrow X'$ , будем называть чувствительностью этого функционала к указанной в аргументах вариации состояния системы.

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

$$\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u'(\cdot)) = L(u'(\cdot)) - L(u(\cdot)). \quad (3)$$

Полагая

$$u'(x) = u(x) + \Delta u(x)$$

и разлагая правую часть (3) в функциональный ряд по  $\Delta u(x)$ , получим:

$$\begin{aligned} \Delta L(u(\cdot) \rightarrow u(\cdot) + \Delta u(\cdot)) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n!}\right) \int dx_1 \dots \int dx_n \times \\ &\times L^{(n)}(x_1, \dots, x_n, u(\cdot)) \Delta u(x_1) \dots \Delta u(x_n), \end{aligned} \quad (4)$$

где

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

есть функциональная производная от  $L$  по  $u(x)$  -го порядка.

Если  $L$  линейным образом зависит от  $u(x)$ , то в разложении (4) остается лишь первый член:

$$\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u(\cdot) + \Delta u(\cdot)) = \int L^{(1)}(x, u(\cdot)) \Delta u(x) dx = \int \frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x) dx} \Delta u(x) dx. \quad (5)$$

В случае нелинейной зависимости  $L$  от  $u(\cdot)$  соотношение (5) остается приближенно справедливым для малых вариаций:

$$\Delta L(u(\cdot) \rightarrow u(\cdot) + \Delta u(\cdot)) \approx \int \frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x) dx} \Delta u(x) dx. \quad (6)$$

Эта формула дает линейное приближение теории чувствительности. Входящую в нее первую производную от  $L$  принято называть коэффициентом дифференциальной чувствительности (см. [3]). Функция

$$S = \frac{u(x_1)}{L} \frac{\delta L(u(\cdot))}{\delta u(x_1) dx_1} \quad (7)$$

описывает изменение  $L$  в процентах, обусловленное изменением  $u$  в единичном интервале около  $x_1$  на 1%.

**Чувствительность показания спутникового ИК-гиперспектрометра к вариациям содержания газа  $l$  в атмосфере.** Исследуем чувствительность показания спутникового ИК-гиперспектрометра к вариациям содержания газа  $\rho_l(z)$  в атмосфере. Пусть  $\rho_l(z)$  изменяется на уровне  $z_0$ . Тогда коэффициент дифференциальной чувствительности принимает следующий вид:

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

После вычисления вариационных производных, находим

$$\frac{\delta L_v}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} = -(\sec \theta) \kappa_l(\nu, z_0) [L_\nu(0, z; \theta) - L_\nu^{\varepsilon=1}(z_0, z; \theta)], \quad (8)$$

где

$$L_\nu^{\varepsilon=1}(z_0, z; \theta) = B_\nu [T(z_0)] P_\nu(z_0, z; \theta) + \int_{z_0}^z B_\nu [T(z')] \frac{dP_\nu(z', z; \theta)}{dz'} dz'.$$

Выражение (8) показывает, что коэффициент дифференциальной чувствительности показаний каналов прибора к вариациям плотности исследуемого газа выражается через массовый коэффициент поглощения этого газа  $\kappa_l(\nu, z_0)$  и универсальную функцию  $U = [L_\nu(0, z; \theta) - L_\nu^{\varepsilon=1}(z_0, z; \theta)]$ , определяемую интенсивностями уходящего излучения для невозмущенной атмосферы.

Используя равенство (6), для вариации функционала  $\Delta L_\nu$  получаем:

$$\Delta L_\nu [0, z; \theta; \rho_l(\cdot) \rightarrow \rho_l(\cdot) + \Delta \rho_l(\cdot)] = \int \frac{\delta L_\nu}{\delta \rho_l(z_0) dz_0} \Delta \rho_l(z_0) dz_0.$$

**Численные результаты.** Расчеты коэффициентов дифференциальной чувствительности проведены для гиперспектрометра AIRS/Aqua с использованием созданного авторами на базе кода LBLRTM [4] вычислительного комплекса. Основными блоками этого комплекса являются: 1) код LBLRTM, позволяющий проводить расчет интенсивности уходящего излучения методом полинейного счета с высоким спектральным разрешением, 2) программы подготовки необходимых для LBLRTM характеристик системы и прибора, 3) основная программа расчета

интенсивностей в каждом канале зондировщика и соответствующих им яркостных температура, а также коэффициентов дифференциальной чувствительности AIRS к вариациям содержания газа  $l$  в атмосфере. Ключевым элементом последнего блока комплекса являются представленные выше новые результаты по дифференциальной чувствительности показаний гиперспектрометра к вариациям характеристик атмосферы.

На рис. 1-2 представлены численные значения универсальной функции  $U$  для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS/Aqua, использованных в [5,6] для восстановления профиля содержания метана, для летних среднеширотной и субарктической атмосфер.

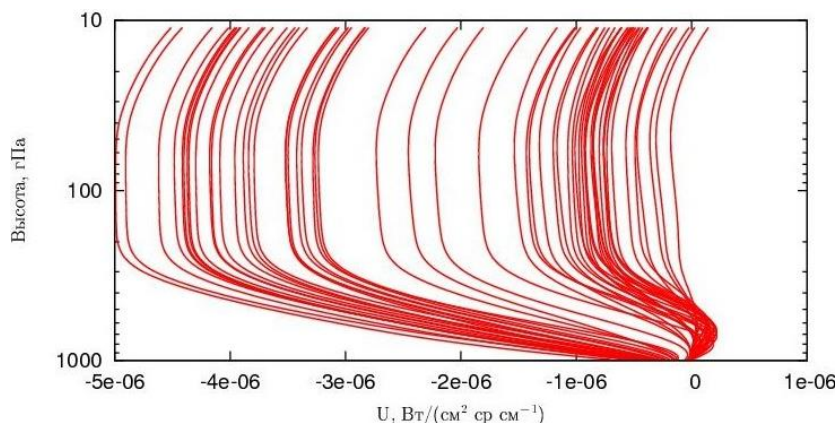


Рис. 1. Универсальная функция  $U$  для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS, используемых для восстановления профиля содержания метана, в летней субарктической атмосфере.

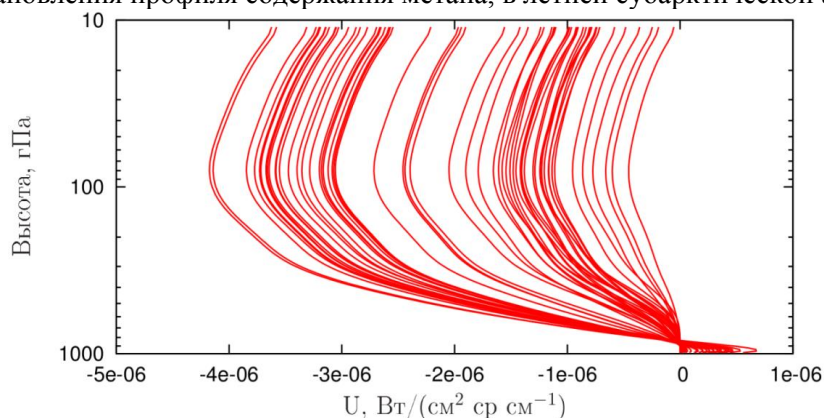


Рис. 2. Универсальная функция  $U$  для спектральных каналов гиперспектрометра AIRS, используемых для восстановления профиля содержания метана, в летней среднеширотной атмосфере

**Выводы.** Рассмотрена задача расчета чувствительности показания спутникового гиперспектрометра ИК-диапазона к вариациям газового состава атмосферы. В рамках функциональной теории чувствительности показано, что коэффициент дифференциальной чувствительности показаний каналов прибора к вариациям плотности исследуемого газа выражается через массовый коэффициент поглощения этого газа и функцию, определяемую интенсивностями уходящего излучения для невозмущенной атмосферы. Представлены численные значения универсальной функции для гиперспектрометра AIRS/Aqua, полученные с использованием созданного на базе кода LBLRTM вычислительного комплекса для нескольких моделей атмосферы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретической основы атмосферной оптики. СПб: Наука, 2003.
- [2] Лагутин А.А., Литвинов В.А., Учайкин В.В. Теория чувствительности в физике космических лучей. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 1995.

- [3] Лагутин А.А., Учайкин В.В. Метод сопряженных уравнений в теории переноса космических лучей высоких энергии. Барнаул: Изд-во Алт. Ун-та, 2013.
- [4] Clough S.A. Shephard M.W., Mlawer E.J. et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes // JQSRT. 2005. V. 91. P. 233-244.
- [5] Xiong X., Barnett C., Zhuang Q. et al. Mid-upper tropospheric methane in the high Northern Hemisphere: Spaceborne observations by AIRS, aircraft measurements, and model simulations // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D19309.
- [6] Мордвин Е.Ю., Лагутин А.А. Метан в атмосфере Западной Сибири. Барнаул: Изд-во Азбука, 2016.