

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ  
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.41

**Погрешность определения эффективной температуры  
слоев воздуха и подстилающей поверхности Земли  
в используемой модели атмосферы при расчетах  
содержания метана**

**С.А. Шишигин\***

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 23.03.2021 г.

Проведен анализ модели атмосферы в виде одного и двух однородных слоев до высоты 5 км. Параметры слоев определены для стандартной атмосферы при условии, что вклад в уходящее излучение атмосферы в исследуемых спектральных участках линий поглощения метана 1235,95–1236 и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup> равен вкладу в уходящее излучение Земли всеми неоднородными слоями, их составляющими. Рассмотрена возможность корректировки температуры воздуха и подстилающей поверхности Земли при определении содержания метана в атмосфере.

*Ключевые слова:* атмосфера, метан, температура, однородный слой, ИК-излучение, спектр, метод; atmosphere, methane, temperature, homogeneous layer, IR radiation, spectrum, method.

**Введение**

Высокая скорость изменения содержания парниковых газов в атмосфере, влияющих на климат планеты, обуславливает важность задачи их мониторинга с помощью спутникового и наземного зондирования в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра с высоким разрешением [1]. Определение атмосферных параметров и содержания исследуемых газов из зарегистрированных ИК-спектров атмосферы представляет собой некорректную обратную задачу, для решения которой необходима точная априорная информация о вертикальных профилях температуры атмосферы и температуры подстилающей поверхности, влияющей на погрешность решения [2–8].

Особенностью колебательно-вращательных полос поглощения метана является изменение спектрального коэффициента поглощения с изменением температуры [9]. Уменьшение значений функции пропускания с ростом температуры в одних участках спектра и возрастание в других при температурном заселенности колебательно-вращательных уровней полосы поглощения метана. Изменение температуры газа на 1–50 °С приводит к увеличению энергии молекулы на  $\sim 0,87 \cdot 10^{-4}$ – $4,35 \cdot 10^{-3}$  эВ, что соответствует интервалу энергий между последовательными вращательными уровнями молекулы.

Ошибка в температурном профиле в несколько градусов может давать вклад в функцию пропускания атмосферы, который дает погрешность, сравнимую с вариациями среднего содержания газов (CH<sub>4</sub> – 8%, CO<sub>2</sub> – 2%) [10].

Для устранения влияния ошибки модельного профиля температуры атмосферы на погрешность определения содержания парниковых газов в воздухе по измерениям ИК-спектров в работе [10] использовались спектральные линии, слабо зависящие от вариаций температуры воздуха. Показано существенное снижение влияния вариаций температуры воздуха на изменение функции пропускания излучения атмосферой в отобранных линиях.

В статье [11] предложено определять содержание метана в атмосфере одновременно в двух спектральных участках уходящего излучения атмосферы: в крыльях линий в *P*-ветви (1240,901–1240,949 см<sup>-1</sup>) и *R*-ветви (1327,12–1327,17 см<sup>-1</sup>) полосы поглощения метана, с противоположной зависимостью коэффициента поглощения излучения метана от изменения температуры газа. Однако *R*-ветвь характеризуется сильным поглощением и обычно не используется при обработке результатов измерений уходящего излучения Земли; атмосфера в спектральном диапазоне 1327,12–1327,17 см<sup>-1</sup> непрозрачна. Коэффициенты молекулярного поглощения в *P*- и *R*-ветвях отличаются почти в 10 раз.

В данной работе рассмотрена возможность корректировки эффективной температуры как слоя

\* Сергей Алексеевич Шишигин (ssa@iao.ru).

воздуха, так и подстилающей поверхности Земли при определении содержания метана в атмосфере на основе анализа уходящего излучения Земли только в  $P$ -ветви полосы поглощения метана.

### Основные соотношения для расчета температуры слоев воздуха и подстилающей поверхности Земли

Рассмотрим модель атмосферы в виде горизонтальных однородных слоев толщиной 100 м и преобразуем ее в виде одного или двух слоев, без изменения мощности уходящего излучения атмосферы спектральных участков 1235,95–1236 и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup>. Определим отклонение содержания исследуемого газа в каждом слое от стандартного вертикального распределения газа в атмосфере с помощью методики [11]. Размер однородного слоя выбирается произвольно, что позволяет оперативно контролировать изменения содержания исследуемого газа во всех слоях атмосферы Земли.

Температура поверхности Земли, которая характеризует минимальную разность между рассчитанными содержаниями метана в атмосфере по уходящему излучению в каждом спектральном участке при вариациях температуры поверхности Земли в используемой модели атмосферы [11], лучше всего соответствует эффективной температуре подстилающей поверхности Земли, определяющей исследуемые мощности уходящего излучения.

Для модели атмосферы из двух однородных слоев и двух спектральных участков уходящего излучения  $\Delta\nu_1$  и  $\Delta\nu_2$  отклонение мощности уходящего излучения  $\Delta S_1$ ,  $\Delta S_2$  от мощности излучения для выбранной модели атмосферы из-за изменения содержания газа в каждом из слоев атмосферы можно записать в виде системы двух уравнений [12]:

$$\begin{cases} \langle \Delta S_1 \rangle = S_1^* - S_{2,1} = C_{1,1}(1 - \alpha_{1,1}\Delta N_2)\Delta N_1 + C_{2,1}\Delta N_2; \\ \langle \Delta S_2 \rangle = S_2^* - S_{2,2} = C_{1,2}(1 - \alpha_{1,2}\Delta N_2)\Delta N_1 + C_{2,2}\Delta N_2. \end{cases} \quad (1)$$

Параметры  $C_{1,1}$ ,  $C_{2,1}$ ,  $C_{1,2}$ ,  $C_{2,2}$ ,  $\alpha_{1,1}$ ,  $\alpha_{1,2}$  определяют влияние изменения содержания исследуемого газа в слоях  $\Delta N_1$ ,  $\Delta N_2$  на изменение мощности уходящего излучения стандартной атмосферы  $\langle \Delta S_1^0 \rangle$ ,  $\langle \Delta S_2^0 \rangle$  и рассчитываются аналитически:

$$C_{1,1} = \frac{\langle \Delta S_{1,0}^0 \rangle}{\Delta N_1}, \text{ где } \langle \Delta S_{1,0}^0 \rangle = \langle \Delta S_1^0 \rangle \text{ при } \Delta N_2 = 0;$$

$$C_{1,2} = \frac{\langle \Delta S_{2,0}^0 \rangle}{\Delta N_1}, \text{ где } \langle \Delta S_{2,0}^0 \rangle = \langle \Delta S_2^0 \rangle \text{ при } \Delta N_2 = 0;$$

$$C_{2,1} = \frac{\langle \Delta S_{1,0}^0 \rangle}{\Delta N_2}, \text{ где } \langle \Delta S_{1,0}^0 \rangle = \langle \Delta S_1^0 \rangle \text{ при } \Delta N_1 = 0;$$

$$C_{2,2} = \frac{\langle \Delta S_{2,0}^0 \rangle}{\Delta N_2}, \text{ где } \langle \Delta S_{2,0}^0 \rangle = \langle \Delta S_2^0 \rangle \text{ при } \Delta N_1 = 0;$$

$$\alpha_{1,1} = \frac{C_{2,1}\Delta N_2 + C_{1,1}\Delta N_1 - \langle \Delta S_1^0 \rangle}{C_{1,1}\Delta N_1\Delta N_2};$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{C_{2,2}\Delta N_2 + C_{1,2}\Delta N_1 - \langle \Delta S_2^0 \rangle}{C_{1,2}\Delta N_1\Delta N_2}.$$

Система уравнений (1) решается сначала для однослойной модели атмосферы ( $\Delta N_2 = 0$ ) при варьировании температуры поверхности Земли и эффективной температуры однородного слоя воздуха. Определяется минимальная разность  $\Delta N_{\Delta\nu_1} - \Delta N_{\Delta\nu_2}$  содержания метана в атмосфере, рассчитанного по уходящему излучению Земли в каждом исследуемом спектральном участке, соответствующая конкретному значению температуры поверхности Земли  $Q_3$  и эффективной температуре модельного однородного слоя атмосферы  $Q$ .

Дальнейшие вычисления проводятся для двухслойных моделей атмосферы с возможными толщинами слоев при  $Q_3$ ,  $\Delta N_{\Delta\nu_1}$ ,  $\Delta N_{\Delta\nu_2}$ . Знание общего содержания метана в атмосфере позволяет выразить содержание метана в одном из слоев как  $\Delta N_1 = \Delta N_{\Delta\nu_1} - \Delta N_2$  в первом уравнении системы (1) и  $\Delta N_1 = \Delta N_{\Delta\nu_2} - \Delta N_2$  во втором. Таким образом получаем систему уравнений с одним неизвестным. Решение системы находится для всех возможных моделей двухслойной атмосферы при минимальной разности искоемых значений путем варьирования эффективной температуры исследуемого слоя для каждого спектрального участка.

Чувствительность мощности уходящего излучения в спектральных участках 1235,95–1236 и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup> к содержанию исследуемого газа в слое равна  $C_{1P}$  и  $C_{1R}$  соответственно. Отклонение содержания газа в исследуемом слое от модельного при мощности прошедшего слой излучения  $S_1$ ,  $S_2$  определяется по величине отклонения содержания газа от модельного  $\Delta N_x = (S_1 - \Delta S_{1M})/C_{1P}$  или  $\Delta N_x = (S_2 - \Delta S_{2M})/C_{1R}$ .

Используя рассчитанные значения эффективных температур и соответствующие им средние значения функций пропускания и спектральной энергетической яркости теплового излучения слоев двухслойных моделей атмосферы, определяется среднее значение функции энергетической яркости теплового излучения для каждого элементарного слоя рассматриваемой модели атмосферы по формуле

$$B_n = \frac{(1 - T_a)B_a - (1 - T_1)T_3T_nB_1 - (1 - T_3)B_3}{(1 - T_n)T_3}, \quad (2)$$

где  $T_a$ ,  $B_a$ ,  $T_1$ ,  $B_1$ ,  $T_n$ ,  $B_n$ ,  $T_3$ ,  $B_3$  – средние значения функций пропускания и спектральной энергетической яркости теплового излучения всей толщи атмосферы, до слоя  $n$ , слоя  $n$ , над слоем  $n$ . Соотношение между ними имеет вид:  $T_a = T_1T_nT_3$ . Температура слоя определяется по формуле Планка  $Q_n = hc/c/K \cdot \ln(2hc^3/c^2/B_n + 1) B_n$  [Вт/(см<sup>2</sup> · ср · см<sup>-1</sup>)], где  $c$  [см/с] – скорость света,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  [Дж · с],  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/град].

## Результаты модельных расчетов параметров атмосферы

Расчеты проведены для однородных атмосферных слоев до высоты 5 км. Параметры слоев воздуха, используемые в модели, приведены в таблице в [11]. Найдены спектральные участки 1277,5–1277,55 и 1235,95–1236 см<sup>-1</sup> с близкими средними по спектру коэффициентами поглощения метана, но с обратными зависимостями от температуры метана.

Зависимости средних в рассматриваемых спектральных участках значений молекулярных коэффициентов поглощения метана от температуры приведены на рис. 1. При расчетах спектра пропускания и коэффициента поглощения ИК-излучения атмосферными газами с разрешением 0,001 см<sup>-1</sup> использовалась информационная система SPECTRA (ИОА СО РАН) [9].

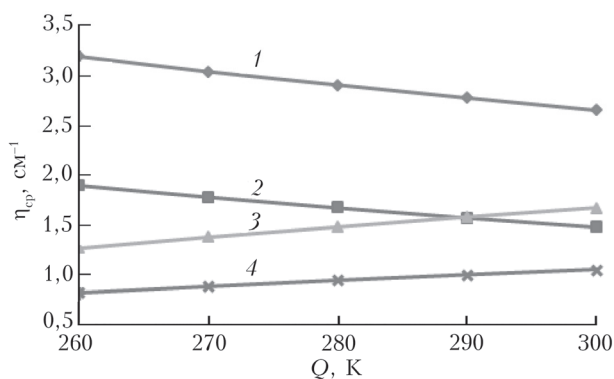


Рис. 1. Температурная зависимость средних значений коэффициентов поглощения метана в спектральных участках 1277,5–1277,55 (1–2) и 1235,95–1236 см<sup>-1</sup> (3–4) при давлениях 1 (1, 3) и 0,5 атм (2, 4)

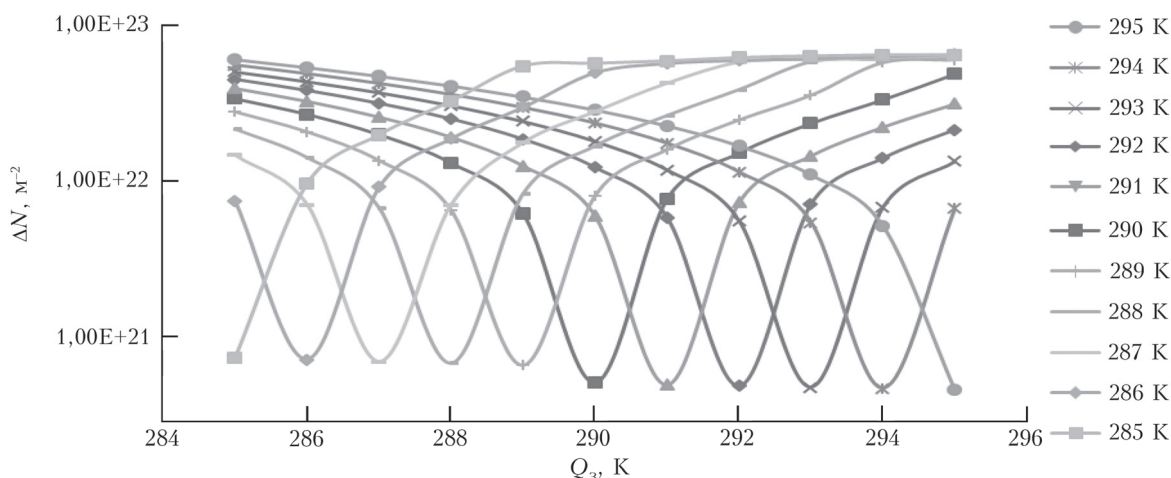


Рис. 3. Типичная зависимость минимальной разности содержания метана в атмосфере, рассчитанной по уходящему излучению в каждом спектральном участке 1235,95–1236 и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup>, от температуры поверхности Земли в рассматриваемой модели (в легенде указана температура поверхности Земли, соответствующая конкретным значениям мощности уходящего излучения в спектральных участках)

На рис. 2 показана зависимость разности мощностей излучения, уходящего из эффективного слоя атмосферы высотой 5 км, от температуры поверхности Земли на участках 1235,95–1236 (S<sub>1</sub>) и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup> (S<sub>2</sub>).

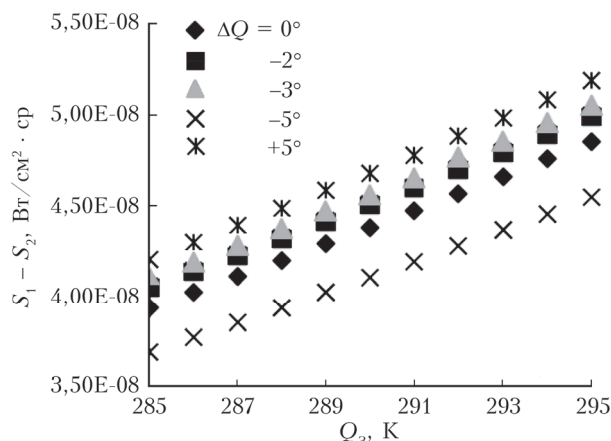


Рис. 2. Зависимость разности мощностей уходящего излучения на участках 1235,95–1236 и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup> от температуры поверхности Земли

Использовался стандартный профиль температуры атмосферы  $\Delta Q = 0^\circ$  (см. табл. в [11]) и профили, смещенные на  $-2^\circ$ ;  $-3^\circ$ ;  $-5^\circ$ ;  $+5^\circ$ .

Разность мощностей уходящего излучения в двух участках спектра с противоположной зависимостью коэффициента поглощения исследуемого газа от температуры однозначно характеризует как температуру поверхности Земли, так и температурный профиль атмосферы.

На рис. 3 приведена минимальная разность содержания метана в атмосфере, рассчитанная по уходящему излучению в каждом спектральном участке (1235,95–1236 и 1277,5–1277,55 см<sup>-1</sup>),

в зависимости от температур, соответствующих конкретным значениям мощности уходящего излучения в данных спектральных участках, и от температуры поверхности Земли в рассматриваемой модели.

Получены минимальные значения разности содержания метана в слоях атмосферы, рассчитываемой по уходящему излучению атмосферы в каждом спектральных участке  $1235,95\text{--}1236\text{ см}^{-1}$ ,  $1277,5\text{--}1277,55\text{ см}^{-1}$  при  $Q_3 = 290\text{ К}$  и вариации температуры воздуха данных слоев. Использовалось уходящее излучение в данных участках спектра при стандартном профиле температуры воздуха  $\Delta Q = 0^\circ$  (таблица [11]) и профилях, смещенных на  $-2$ ;  $-3$ ;  $-5$ ;  $+5^\circ$ .

На рис. 4 приведены отклонения профилей температур слоев воздуха от стандартного профиля до высоты 5 км, рассчитанные по соответствующей паре значений уходящего излучения.

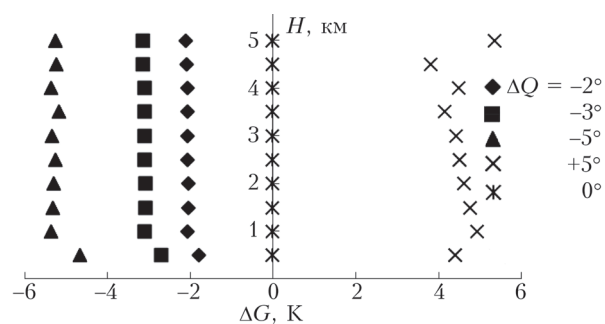


Рис. 4. Отклонения профиля температур воздуха от стандартного до высоты 5 км, рассчитанные по уходящему излучению

Таким образом, показано, что минимизация разности содержания метана в атмосфере, рассчитанного по уходящему излучению Земли в каждом из двух спектральных участков с противоположной зависимостью коэффициента поглощения излучения от изменения температуры газа при вариации температуры поверхности Земли и температуры эффективного слоя атмосферы, наблюдается при совпадении этих температур с параметрами атмосферы.

### Заключение

Рассмотрена возможность использования разного влияния температуры среды на коэффициент поглощения в двух спектральных участках  $P$ -ветви колебательно-вращательной полосы метана для уточнения параметров среды в процессе вычисления содержания исследуемого газа в воздухе.

Минимальная разность содержания метана в атмосфере, рассчитанная по уходящему излучению Земли в спектральных участках  $1235,95\text{--}1236$  и  $1277,5\text{--}1277,55\text{ см}^{-1}$   $P$ -ветви полосы поглощения метана при вариациях температуры поверхности земли и температуры эффективного слоя атмосфе-

ры, соответствует температурам среды для исследуемого уходящего излучения атмосферы.

Спутниковые спектрометры (AIRS, IASI, IMG, ATMOS, ACE, MIRAS, ИКФС-2 и др.) имеют спектральное разрешение в пределах  $1\text{--}10^{-2}\text{ см}^{-1}$  при регистрации уходящего излучения Земли, которое зависит от температуры среды. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при обработке спектров, полученных при помощи современных сенсоров, установленных на спутниках.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения температуры и излучательной способности поверхности суши по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 4. С. 85–90.
2. Грищенко М.Ю., Чернулич К.К. Исследование связи наземных и космических температурных данных на примере островов Врангеля и Кунашир // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63, № 5. С. 566–575.
3. Волкова Е.В., Успенский С.А. Дистанционное определение температуры подстилающей поверхности, приземной температуры воздуха и эффективной температуры по спутниковым данным для юга Европейской территории России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 291–303.
4. Зверев А.Т., Фисенко Е.В. Современные методы определения засушливых земель по космическим снимкам // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 3. С. 53–63.
5. Sobrino J.A., Jimenez-Munoz J.C., Zarco-Tejada P.J., Sepulcre-Canto G., Miguel E. Land surface temperature derived from Airborne Hyperspectral Scanner Thermal Infrared Data // Remote Sens. Environ. 2006. V. 102. P. 99–115.
6. Jimenez-Munoz J.C., Sobrino J.A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2014. V. 11, iss. 10. P. 1840–1843.
7. Suga Y., Ogawa H., Ohno K., Yamada K. Detection of surface temperature from Landsat-7/ETM+ // Adv. Space Res. 2003. V. 32, iss. 11. P. 2235–2240.
8. Jimenez-Munoz J.C., Cristobal J., Sobrino J.A., Soria G., Ninyerola M., Pons X. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2009. V. 47, iss. 1. P. 339–349.
9. Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 9. С. 765–776.
10. Рокотян Н.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И. Эффект температурно-независимого поглощения и его использование для зондирования парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 6. С. 510–515.

11. Шиигин С.А. Исследование корректировки определения содержания газа в воздухе по уходящему излучению атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 11. С. 925–929.

12. Шиигин С.А. Методика определения содержания метана в атмосфере с помощью корреляционного радиометра // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. С. 3–8.

***S.A. Shishigin. Determination of the temperature of air and the Earth's underlying surface in model calculations of methane content in the atmosphere.***

The analysis of the atmospheric model, presented in the form of one and two homogeneous layers up to a height of 5 km, was carried out. The parameters of the layers are determined for the standard atmosphere, provided that the contribution to the outgoing radiation of the atmosphere in the spectral ranges of the methane absorption line  $1235.95\text{--}1236\text{ cm}^{-1}$  and  $1277.5\text{--}1277.55\text{ cm}^{-1}$  is equal to the contributions to the outgoing radiation of the Earth by all inhomogeneous layers which make them up. Possible correction of the air and underlying surface temperature in determination of methane content in the Earth's atmosphere is considered.