

УДК 551.510.41

Исследование корректировки определения содержания газа в воздухе по уходящему излучению атмосферы

С.А. Шишигин*

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

Поступила в редакцию 28.03.2019 г.

Рассмотрена модель атмосферы в виде последовательности однородных слоев толщиной 100 м от поверхности Земли до высоты 5 км. Параметры слоев определены для стандартной атмосферы. Вклад в уходящее излучение атмосферы в исследуемых спектральных участках полосы поглощения метана P - (1240,901–1240,949 см^{-1}) и R -ветвей (1327,12–1327,17 см^{-1}) равен вкладам в уходящее излучение Земли всеми неоднородными слоями, их составляющими. Показан возможный метод корректировки температуры слоя атмосферы и подстилающей поверхности Земли по сходимости результатов одновременных расчетов содержания исследуемого газа в слоях атмосферы по уходящему излучению в P - и R -ветвях полосы поглощения этого газа.

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

Введение

В современном мире постоянно ведутся разработки средств контроля параметров атмосферы, а также региональный и глобальный мониторинг парниковых газов с помощью сети наземных станций и аэрокосмических методов [1, 2], необходимый для обнаружения стоков и источников парниковых газов, предсказания их трендов и дальнейшего прогнозирования климата. Глобальный мониторинг обеспечивается самолетными (активные методы [3, 4]) и космическими (пассивные методы [5–8]) измерениями.

Пассивные спутниковые методы основаны на принципах приема отраженного от поверхности Земли и прошедшего по касательной в атмосфере солнечного излучения, а также теплового излучения подстилающей поверхности Земли и атмосферы.

Рост концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы через определенный промежуток времени наблюдается не только в нижней атмосфере, но и во всей ее толще [3, 9]

Изменчивость парниковых газов CO_2 , CH_4 , N_2O в пограничном слое атмосферы в 2–3 раза выше, чем в свободной атмосфере. Возрастание концентрации CO_2 начинается с пограничного слоя атмосферы, затем, спустя 1–2 года, наблюдается во всей ее толще, что приводит к изменению стандартной модели атмосферы. Результаты наблюдений малых газовых составляющих атмосферы показывают, что концентрации CO_2 , CH_4 , N_2O в стратосфере и пограничном слое атмосферы хорошо коррелируют [10].

В [11] спутниковые данные о содержании CO , CO_2 , CH_4 (сенсоры MOPITT, AIRS, IASI) сопоставлены с результатами наземных измерений с помощью

солнечных дифракционных и солнечных Фурье-спектрометров; корреляция между ними практически отсутствует.

Для изучения биогеохимических циклов парниковых газов необходимо определять содержание газов с погрешностью 0,3 ppm для CO_2 , 10 ppb для CO , 100 ppb для CH_4 с горизонтальным разрешением 10 км в приземных слоях атмосферы (0–15 км) [12].

Необходимость развития и совершенствования физико-математических моделей атмосферы и алгоритмов обработки данных дистанционных измерений в настоящее время обусловлена высокими требованиями к точности измерений содержания парниковых газов в воздухе. Существующие алгоритмы обработки измерений относительно новые и не позволяют достаточно точно определять изменения концентрации парниковых газов в приземном слое тропосферы (0–3 км) [11].

Разрешение спутниковых приборов для надирного зондирования (AIRS, IASI, IMG, TANSO-FTS, ИКФС и др.) находится в пределах $\sim 0,2\text{--}0,6 \text{ см}^{-1}$, а характерное разрешение приборов для лимбового зондирования (ATMOS, ACE, MIRAS, TES-Limb и др.) на порядок выше: $\sim 0,015\text{--}0,035 \text{ см}^{-1}$ [13]. Ширина спектральных линий оптически активных газов в средней тропосфере составляет $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$, а в районе тропопаузы $\sim 0,01 \text{ см}^{-1}$. Следовательно, спутниковые спектрометры регистрируют интегральные по частоте величины, зависящие от температуры, но почти не зависящие от давления воздуха, поэтому необходимо использовать точные значения температуры исследуемой среды.

Для устранения влияния ошибки модельного профиля температуры атмосферы на погрешность

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

определения содержания парниковых газов в воздухе по данным измерений ИК-спектров в [14] предложено использовать 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 настоящей работе рассмотрена возможность эффективной корректировки температуры слоев воздуха и подстилающей поверхности Земли при определении содержания метана в атмосфере на основе анализа уходящего излучения Земли в P - (1240,901–1240,949 см^{-1}) и R -ветвях (1327,12–1327,17 см^{-1}) полосы поглощения CH_4 .

Основные соотношения для расчета содержания газов в атмосфере

Усредненную по спектру светимость атмосферы s в дальнем ИК-участке $\Delta\nu$ для неоднородной атмосферы представим в виде суммы светимостей горизонтальных однородных слоев:

$$\langle s \rangle \approx \Delta\nu \left(\epsilon B_e \left\langle \prod_{k=1}^n T_k \right\rangle + \sum_{k=1}^n B_k \left\langle (1 - T_k) \prod_{i=k+1}^n T_i \right\rangle \right), \quad (1)$$

где ϵ – степень черноты поверхности земли; B – среднее значение светимости абсолютно черного тела в спектральном участке $\Delta\nu$; индекс e относится к земле; индекс k относится к атмосфере с температурой θ ; T_k – спектральная плотность пропускания излучения k -м элементарным слоем атмосферы в участке $\Delta\nu$. Солнечной радиацией в дальней ИК-области спектра можно пренебречь. Излучение Солнца у поверхности земли в данной области спектра ($\lambda > 4 \text{ мкм}$) значительно меньше теплового излучения самой поверхности [15]. Аэрозольное ослабление излучения в дальней ИК-области спектра для слабо

замутненной атмосферы незначительно, и его можно не учитывать [16].

Параметры слоев используемой модели атмосферы приведены в таблице. Увеличение количества однородных слоев приближает параметры рассматриваемой модели к стандартной модели атмосферы. Количество однородных слоев можно значительно уменьшить последовательным объединением двух соседних слоев в один при условии, что вклад в мощность уходящего излучения атмосферы в исследуемом спектральном участке равен вкладу в мощность уходящего излучения Земли неоднородных слоев атмосферы [15]. Объединение двух соседних слоев проводится до получения модели атмосферы в виде единственного однородного слоя без изменения мощности уходящего излучения атмосферы.

Мощность уходящего излучения атмосферы в спектральном участке $\Delta\nu$ представим в виде суммы излучения поверхности земли и слоя воздуха:

$$S = \int_{\Delta\nu} P_3(\nu, Q_3) T_c(\nu, Q) d\nu + \int_{\Delta\nu} (1 - T_c(\nu, Q)) B_c(\nu, Q) d\nu, \quad (2)$$

где $T_c(\nu, Q)$ – спектральная функция пропускания излучения слоя атмосферы при температуре Q ; $P_3(\nu, Q_3)$ – спектральная яркость излучения поверхности земли при температуре Q_3 ; $B_c(\nu, Q)$ – излучение абсолютно черного тела на частоте ν . Эффективная температура Q слоя воздуха зависит от функции пропускания атмосферы и, следовательно, изменяется для разных спектральных участков.

Особенностью P - и R -ветвей колебательно-вращательных полос поглощения атмосферных газов является различная зависимость коэффициентов поглощения от температуры в них [17]. Зависимость среднего значения молекулярного коэффициента

Параметры модели атмосферы

H , м	T , К	P , атм	O_2 , %	N_2 , %	CH_4 , $10^{-4}\%$	CO_2 , $10^{-4}\%$	CO , $10^{-4}\%$	N_2O , $10^{-4}\%$	O_3 , $10^{-4}\%$	H_2O , $10^{-4}\%$
100	288,15	1	21	78	1,6	370	0,250	0,420	0,027	7730
300	286,85	0,9765	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,026	6800
500	285,55	0,9535	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,026	6800
800	283,6	0,91975	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,026	6800
1000	282,3	0,89781	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,026	6800
1300	280,35	0,86569	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	5000
1500	279,05	0,84479	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	5000
1800	277,1	0,81423	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	5000
2000	275,8	0,79435	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	5000
2300	273,85	0,76527	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
2500	272,55	0,74637	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
2800	270,6	0,71873	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
3000	269,3	0,70076	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
3300	267,35	0,6745	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
3500	266,05	0,65744	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
3800	264,1	0,63251	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
4000	262,8	0,61631	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,024	3700
4300	260,85	0,59265	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,027	2600
4500	259,55	0,57729	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,027	2600
4800	257,6	0,55486	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,027	2600
5000	256,3	0,54030	21	78	1,6	370	0,250	0,400	0,027	2600

поглощения CH_4 от температуры в спектральных участках P - и R -ветвей приведена на рис. 1. Изменение среднего значения молекулярного коэффициента поглощения равно $\Delta\mu \approx \mu \cdot (Q_2 - Q_1) = \mu \cdot \Delta Q_{1,2}$. Для расчетов спектров ослабления ИК-излучения атмосферными газами использовалась информационная система SPECTRA ИОА СО РАН [18].

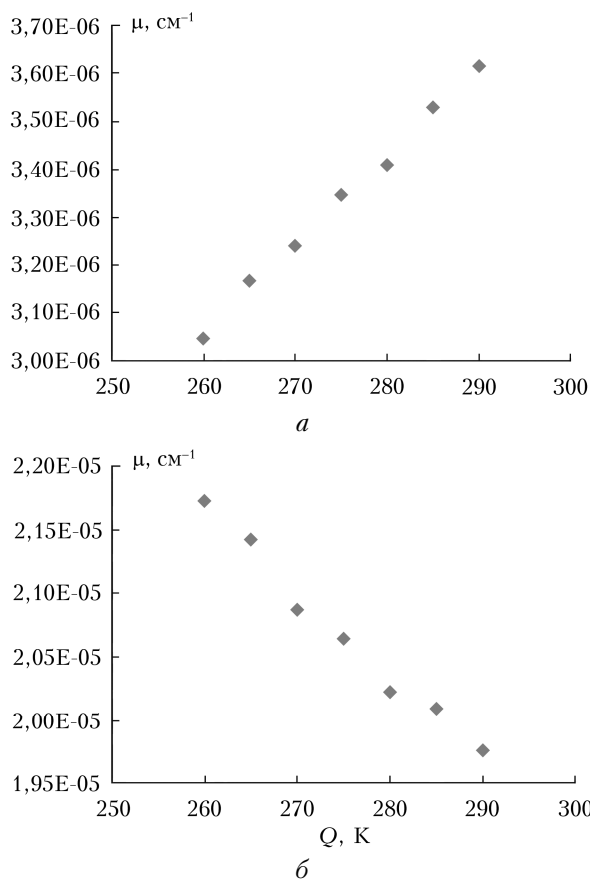


Рис. 1 Среднее значение молекулярного коэффициента поглощения метана в спектральном диапазоне 1240,901–1240,949 (а) и 1327,12–1327,17 cm^{-1} (б) при давлении 1 атм в зависимости от температуры

Погрешность задания профиля температуры воздуха искажает истинное значение функции пропускания эффективного слоя атмосферы. Это приводит к значительной ошибке определения содержания исследуемого газа в выбранном слое по величине уходящего излучения атмосферы. С целью коррекции температуры среды и источника излучения преобразуем соотношение (2) на основе рассматриваемой модели атмосферы. Мощность уходящего излучения в узком спектральном участке $\Delta\nu$ для температуры Q_1 и Q_2 слоя атмосферы, если считать эффективные значения $P_3(\nu, Q_3)$, $B_c(\nu, Q)$ независимыми от частоты излучения, равна

$$\begin{cases} S_1 = \Delta\nu(P_3(Q_3)T_{c1}(Q_1) + (1 - T_{c1}(Q_1))B_{c1}(Q_1)), \\ S_2 = \Delta\nu(P_3(Q_3)T_{c2}(Q_2) + (1 - T_{c2}(Q_2))B_{c2}(Q_2)). \end{cases} \quad (3)$$

Средние значения функции пропускания слоя T_{c1} , T_{c2} в спектральном участке частот $\Delta\nu$ представим в виде

$$\begin{cases} T_{c1} = \exp(-\mu \cdot N) = \exp(-\tau), \\ T_{c2} = \exp((-\mu - \Delta\mu) \cdot N) = T_{c1} \exp(-\tau \cdot \Delta Q_{1,2}) \end{cases} \quad (4)$$

(N – содержание метана).

Зависимость мощности уходящего излучения от температуры воздуха и температуры поверхности земли можно записать следующим образом:

$$S = \Delta\nu((P_3(Q_3 + \Delta Q_3)T_{c1} \exp(-\tau \cdot \Delta Q) + (1 - T_{c1} \exp(-\tau \cdot \Delta Q)) \cdot B_{c1}(Q_1 + \Delta Q)), \quad (5)$$

где
$$\tau = \frac{1}{\Delta Q_{1,2}} \cdot \ln \left[\frac{\frac{1}{\Delta\nu} S_2 - B_{c1}(Q_1 + \Delta Q_{1,2})}{T_{c1}(P_3(Q_3) - B_{c1}(Q_1 + \Delta Q_{1,2}))} \right];$$

ΔQ_3 , ΔQ – отклонение температуры поверхности земли и воздуха соответственно от параметров используемой модели атмосферы.

Содержание метана в рассматриваемом модельном слое атмосферы известно, следовательно, меняя его на ΔN , мы получим изменение мощности уходящего излучения ΔS_1 , ΔS_2 в каждом рассматриваемом участке спектра P - и R -ветвей полосы поглощения CH_4 . Отношения изменения мощности уходящего излучения P - и R -ветвей к изменению содержания метана $C_{1P} = \Delta S_1 / \Delta N$ и $C_{1R} = \Delta S_2 / \Delta N$; отклонение содержания газа в исследуемом слое от модельного при мощности прошедшего слой излучения S_1 , S_2 $\Delta N_x = (S_1 - \Delta S_1) / C_{1P}$ или $\Delta N_x = (S_2 - \Delta S_2) / C_{1R}$.

Анализ полученных результатов

Тепловое излучение поверхности Земли неоднородно, поэтому ее эффективную излучательную способность необходимо определять по результатам измерений уходящего излучения атмосферы.

Погрешность задания профилей температуры воздуха и поверхности земли проявляется в неодинаковом содержании исследуемого газа в слое атмосферы, рассчитываемого по уходящему излучению в P - и R -ветвях полосы поглощения газа. На рис. 2 показаны направления зависимости содержания CH_4 в воздухе от ΔQ_3 и ΔQ , рассчитанной по уходящему излучению в P - и R -ветвях полосы поглощения CH_4 . Крутые отрезки линии с указанием температуры поверхности Земли соответствуют расчетам в спектральных участках P -ветви, а более пологие пересекающиеся отрезки получены по уходящему излучению R -ветви при аналогичной температуре подстилающей поверхности. Звездочкой отмечена заложенная в модельном расчете Q_3 .

На рис. 3 приведена зависимость достигнутого относительного минимального различия содержания

Заключение

Рассмотрена возможность использования свойств противоположного влияния температуры среды в P - и R -ветвях колебательно-вращательной полосы метана на коэффициент поглощения излучения газов для уточнения параметров среды в процессе вычисления содержания исследуемого газа в воздухе.

Минимальное значение разности содержания метана в атмосфере, рассчитанное по уходящему излучению Земли в P - ($1240,901$ – $1240,95$ см^{-1}) и R -ветвях ($1327,12$ – $1327,17$ см^{-1}) полосы поглощения CH_4 при изменении температур поверхности земли и эффективного слоя атмосферы, наблюдается при совпадении этих температур с искомыми в используемой модели атмосферы.

Существенные различия зависимости коэффициентов поглощения от температуры среды в выбранных участках спектра позволяют уточнить эффективную температуру слоя воздуха и излучательную способность подстилающей поверхности.

Предложенная методика может быть использована для обработки спектров, полученных современными сенсорами, установленными на спутниках.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта (№ АААА-А17-117033010037-0).

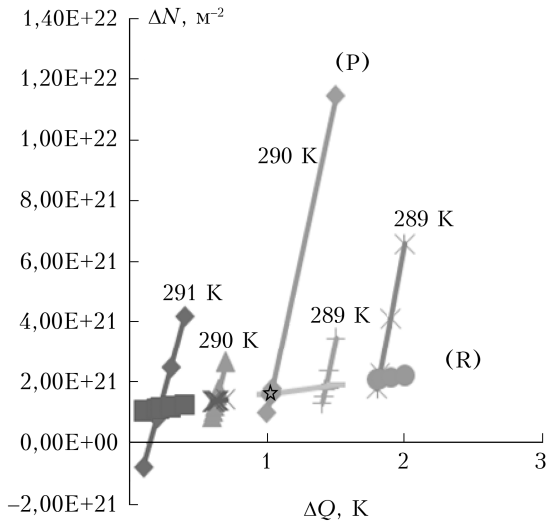


Рис. 2. Отклонение от установленного содержания метана в атмосфере в зависимости от вариаций температуры эффективного слоя атмосферы ΔQ и температуры поверхности земли в спектральном участке P -ветви показано по вертикали (P) и R -ветви показано по горизонтали (R)

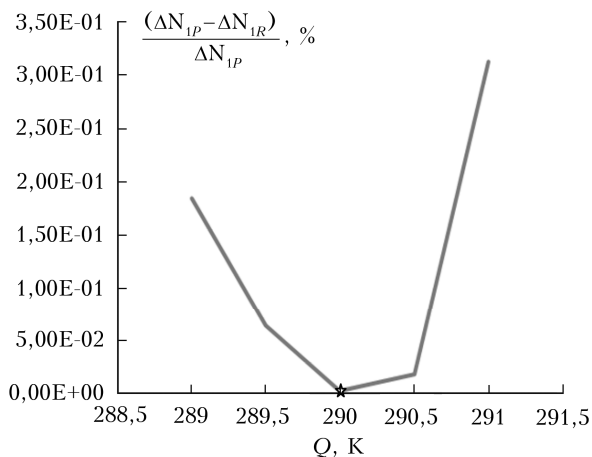


Рис. 3. Минимальное значение разности содержания CH_4 в атмосфере, рассчитанное по уходящему излучению земли в P - и R -ветвях полосы поглощения метана в зависимости от температуры поверхности земли

CH_4 в слое атмосферы, рассчитанного по уходящему излучению атмосферы в P - и R -ветвях полосы поглощения метана, в зависимости от вариации температуры поверхности земли и воздуха. Минимальное значение разности содержания CH_4 наблюдается при совпадении этих температур в используемой модели атмосферы. Температура 290 К соответствует действительному значению температуры поверхности, заключаемой в рассмотренной модели атмосферы.

Проведенные исследования показали, что в машинном эксперименте отклонения от заданного содержания CH_4 в слое атмосферы сильнее всего зависят от вариаций температуры поверхности Земли и воздуха, а наименьшее влияние оказывает ошибка измерения мощности излучения.

1. Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скоороход А.И., Джола А.В., Штабкин Ю.А., Ван Пусай., Ван Ген Чен., Васильева А.В., Макарова М.В., Гречко Е.И. Исследование трендов общего содержания CO и CH_4 над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 6. С. 449–456.
2. Prinn R., Heimbach P., Rigby M., Dutkiewicz S., Melillo J.M., Reilly J.M., Kicklighter D.W., Waugh C. A strategy for a global observing system for verification of national greenhouse gas emissions // Joint Prog. Rep. Ser. 2011. N 200. 92 p.
3. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K.S., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Сравнение распределения концентраций газовых примесей воздуха, измеренных дистанционными и контактными средствами над Российским сектором Арктики // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 542–550.
4. Abshire J.B., Riris H., Hasselbrack W., Allan G., Weaver C., Mao J. Airborne measurements of CO_2 column absorption using a pulsed wavelength-scanned laser sounder instrument // Proc. 2009 Conf. on Lasers and Electro-Optics. Opt. Soc. Am. Paper CFU-2. 2009a. P. 255–256.
5. Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Itasu R. Метод для определения вертикального профиля метана из спектров атмосферы, измеренных одновременно в тепловом и ближнем ИК-диапазонах // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 962–967.
6. Yokota T., Yoshida Y., Eguchi N., Ota Y., Tanaka T., Watanabe H., Maksyutov S. Global Concentrations of CO_2 and CH_4 retrieved from GOSAT: First preliminary results // SOLA. 2009. V. 5. P. 160–163.
7. Crisp D., Atlas R.M., Breon F.M., Brown L.R., Burrows J.P., Ciais P. The Orbiting Carbon Observatory

- (OCO) mission // *Adv. Space Res.* 2004. V. 34, N 4. P. 700–709.
8. *Виротайнен Я.А., Дементьев Б.В., Иванов В.В., Поляков А.В.* Оптимизация параметров газокорреляционного ИК-радиометра для измерения содержания метана в пограничном слое атмосферы с аэрокосмической платформы // *Исслед. Земли из космоса.* 2002. № 5. С. 1–10.
 9. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.Ф., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K.* Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
 10. *Aoki S., Nakazawa T., Machida T., Sugawara S., Morimoto S.* Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica // *Tellus B.* 2003. V. 55, N 2. P. 178–186.
 11. *Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороходов А.И., Гречко Е.И., Сафронов А.Н.* Результаты сопоставления спутниковых измерений общего содержания CO, CH₄, и CO₂ с наземными спектроскопическими данными // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 9. С. 816–824.
 12. *Поляков А.В.* Определение газового состава атмосферы и характеристик аэрозоля затненным методом: дис. канд. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург: Ин-т физики СПбГУ, 2006. 373 с.
 13. *Фалалеева В.А., Фомин Б.А.* Спектроскопические проблемы в прямых задачах спутникового зондирования атмосферы и пути их преодоления // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 9. С. 733–738.
 14. *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.
 15. *Шишигин С.А.* Методика определения содержания метана в атмосфере с помощью корреляционного радиометра // *Исслед. Земли из космоса.* 2015. № 5. С. 3–8.
 16. *Зуев В.Е.* Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М: Советское радио. 1970. 496 с.
 17. *Shishigin S.A., Eremina A.S.* Adjustment of the vertical distribution of gas content in the air on the outgoing radiation of the atmosphere // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. P. 10833-86.
 18. *Михайленко С.Н., Бабилов 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.

S.A. Shishigin. Investigation of the method for correction of gas content in air by the outgoing radiation of the atmosphere.

A model of the atmosphere is considered as a sequence of homogeneous layers 100 m thick from the Earth's surface to a height of 5 km. Layer parameters are defined for a standard atmosphere. Contribution to the outgoing radiation of the atmosphere in the spectral regions of the methane absorption band of the *P*- (1240.901–1240.949 cm⁻¹) and *R*-branches (1327,12–1327,17 cm⁻¹) is equal to the contributions to the outgoing radiation of the Earth by all non-uniform layers. A possible method for adjusting the temperature of the atmospheric layer and the underlying surface according to the convergence of the results of simultaneous calculations of the content of the test gas in atmospheric layers using outgoing radiation in the *P*- and *R*-branches of the absorption band of this gas is shown.