

УДК 551.510.41

Метод корреляционной спектроскопии для анализа спектра уходящего излучения атмосферы

С.А. Шишигин*

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

Поступила в редакцию 11.05.2016 г.

Рассмотрена модель атмосферы в виде тонких однородных слоев, которая преобразуется в два однородных слоя без изменения мощности уходящего излучения в исследуемом спектральном участке полосы поглощения метана 1220–1260 см⁻¹. Наблюдаемое искажение спектра уходящего излучения Земли при рассмотрении модели атмосферы в виде эквивалентного однородного слоя не оказывает влияние на корреляционный газоанализ. Приведена система уравнений, связывающих изменения содержания метана в каждом из однородных слоев с изменением мощности уходящего излучения.

Ключевые слова: ИК-излучение, температура, однородный слой, корреляция, радиометр, атмосфера; IR radiation, temperature, homogeneous layer, correlation, radiometer, atmosphere.

Введение

Метод газокорреляционной радиометрии используется в настоящее время в основном за рубежом для спутниковых измерений содержания метана и окиси углерода в приземном слое атмосферы, наименее доступном для исследования с больших высот. Высокая чувствительность радиометров обусловлена суммированием информации о множестве линий исследуемого газа [1].

В статье [2] показано, что радиометр с оптимальными параметрами газового и интерференционного фильтров при одинаковых условиях измерений позволяет получать в пять раз меньшие ошибки определения содержания метана, чем с параметрами фильтров в газокорреляционном ИК-радиометре MORITT американского спутника EOS. Потенциальная точность измерений содержания метана в слое 0–4 км при оптимальных параметрах фильтров составляет 5–10% от фонового содержания в свободной атмосфере.

Преимущества корреляционного метода по сравнению с другими методами газоанализа — сверхвысокое спектральное разрешение частотного спектра фильтра в виде кюветы с исследуемым газом, отсутствие влияния неселективного взаимодействия излучения со средой (*аэрозолем*, присутствующим даже при безоблачном небе), указывают на перспективность применения корреляционного метода измерения содержания газов в атмосфере со спутника [3].

В работе [4] проведены сопоставления спутниковых данных о содержании CO, CO₂, CH₄ (сенсоры MORITT, AIRS, IASI) с наземными, полученными

с помощью солнечных дифракционных спектрометров, солнечных Фурье-спектрометров. Корреляция между наземными данными о средневзвешенных значениях общего содержания CH₄ и измеренными IASI почти отсутствует. Спутниковые данные AIRS и IASI о содержании CH₄ на уровне средневзвешенных значений не коррелируют. С учетом больших неопределенностей спутниковых данных о составе атмосферы необходимо совершенствовать спутниковую измерительную аппаратуру и алгоритмы расчета.

В настоящей статье рассмотрены представление неоднородной атмосферы в виде двух однородных слоев и методика определения изменения содержания исследуемого газа в интересующей области атмосферы с помощью обработки спектра уходящего излучения методом корреляционной спектроскопии.

Спектр уходящего излучения эффективных однородных слоев атмосферы

Рассматривается модель атмосферы в виде последовательности тонких однородных слоев, имеющих свою температуру и функцию пропускания излучения в выбранном спектральном участке [5–8].

Выходной сигнал радиометра аэрокосмического базирования обусловлен спектральной плотностью уходящего излучения атмосферы S в спектральном участке $\Delta\nu$ для неоднородной атмосферы:

$$S = \varepsilon B_e \prod_{k=1}^n T_k + \sum_{k=1}^n B_k^0 (1 - T_k) \prod_{i=k+1}^n T_i, \quad (1)$$

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

где ε — степень черноты поверхности Земли; B_e — среднее значение спектральной плотности излучения абсолютно черного тела в спектральном участке $\Delta\nu$; индекс e относится к Земле, индекс 0 относится к атмосфере с температурой θ ; T_k — спектральная плотность пропускания излучения k -м слоем атмосферы. Солнечной радиацией в дальней инфракрасной области спектра пренебрегаем. Аэрозольное ослабление не рассматриваем.

Параметры слоев определены для стандартной атмосферы при условии, что вклад в мощность уходящего излучения Земли в исследуемом спектральном участке равен вкладам всех неоднородных слоев атмосферы. Элементарные однородные слои можно объединять в один слой с функцией пропускания, равной произведению функций пропускания слоев, его составляющих, и средним значением спектральной плотности излучения в рассматриваемом участке спектра [7].

Спектральная плотность уходящего излучения Земли для двухслойной модели атмосферы имеет вид

$$S = \varepsilon B_e T_{1,m} T_{2,p} + B_{1,m}^0 (1 - T_{1,m}) T_{2,p} + B_{2,p}^0 (1 - T_{2,p}). \quad (2)$$

Здесь m и p — число элементарных слоев в рассматриваемом более крупном слое атмосферы.

В качестве примера на рис. 1, 2 приведены фрагменты спектров излучения поверхности Земли в диапазоне 1220–1260 см^{-1} и двух однородных слоев воздуха в зенит (1), излучения поверхности Земли и эквивалентного им однородного слоя воздуха (2). Температура поверхности Земли 290 К. Горизонтальные слои воздуха T_1 (давление 1 атм, температура 288,15 К, толщина слоя 100 м) и T_2 (давление 0,835 атм, температура 278,4 К, толщина слоя 100 м).

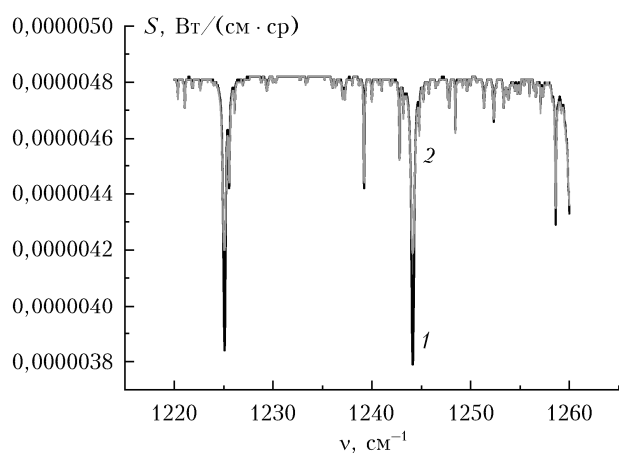


Рис. 1. Фрагменты спектра 1220–1260 см^{-1} излучения в зенит поверхности Земли и двух однородных слоев воздуха (1), поверхности Земли и эквивалентного им однородного слоя воздуха (2)

В диапазоне 1220–1260 см^{-1} наблюдается подобие спектров двух однородных слоев воздуха и эквивалентного им однородного слоя воздуха, однако в области сильных линий поглощения газов эквивалентный однородный слой имеет более сглаженный спектр.

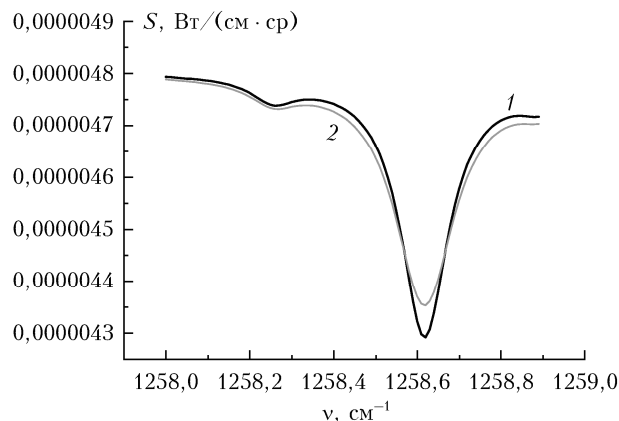


Рис. 2. Фрагменты спектра 1258–1259 см^{-1} излучения в зенит поверхности Земли и двух однородных слоев воздуха (1), поверхности Земли и эквивалентного им однородного слоя воздуха (2)

Это обусловлено операцией усреднения по спектру значения плотности энергетической светимости эквивалентного однородного слоя.

Корреляционный анализ спектра уходящего излучения атмосферы

Проведен корреляционный анализ мощности полученных спектров уходящего излучения (разделения мощности в спектральном участке $\Delta\nu$ на два канала) на основе соотношения

$$\Delta S = \int_{\Delta\nu} [ST_c(\nu) - ST_r(\nu)] d\nu, \quad (3)$$

где $T_c(\nu)$ и $T_r(\nu)$ — функции пропускания дополнительных оптических ослабителей в каждом из каналов при условии $T_r = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_c(\nu) d\nu$. Значения $T_c(\nu)$

соответствуют функции пропускания кюветы длиной 2 см при температуре 296 К, наполненной метаном при давлении 1 или 0,1 атм. При расчетах спектров ослабления ИК-излучения атмосферными газами использовалась информационная система SPECTRA ИОА СО РАН. Спектральное разрешение составило 0,001 см^{-1} . Результаты расчета показали одинаковые значения ΔS как для спектра излучения поверхности Земли и двух однородных слоев воздуха в зенит, так и для излучения поверхности Земли и эквивалентного им однородного слоя воздуха, которые составили для выбранных кювет соответственно $-1,42465\text{E}-09$ и $6,36474\text{E}-08$ $\text{Вт}/(\text{см} \cdot \text{ср})$.

Увеличение коэффициента ослабления излучения на линии поглощения газа и снижение поглощения излучения в крыльях линий поглощения приводят к разному вкладу в уходящее излучение изменения концентрации газа с ростом высоты. Излучение воздуха в спектральных участках полосы поглощения исследуемого газа и ослабление излучения верхними слоями атмосферы обуславливают неоднозначность вклада в мощность уходящего

излучения Земли поглощающего газа на той или иной высоте.

На рис. 3 показаны изменения выходного сигнала корреляционного радиометра из-за увеличения в слое воздуха толщиной 2 км содержания метана на 1% от общей массы CH_4 в столбе атмосферы в зависимости от высоты нахождения слоя при работе корреляционного радиометра в спектральном диапазоне 1220–1260 см^{-1} при давлениях в кювете 0,01; 0,1; 1 атм.

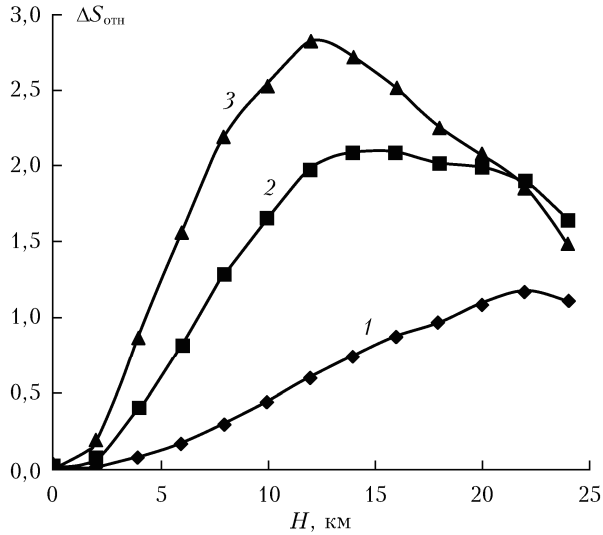


Рис. 3. Изменение сигнала $\Delta S_{\text{отн}}$ корреляционного радиометра с кюветами с одинаковой массой метана в них при давлениях 0,01 (1); 0,1 (2); 1 атм (3) в спектральном диапазоне 1220–1260 см^{-1} , в зависимости от увеличения содержания метана в одном слое на 1% от общей массы CH_4 в столбе атмосферы и высоты нахождения слоя

Наблюдается уменьшение изменения выходного сигнала радиометра $\Delta S_{\text{отн}}$ в приземных слоях атмосферы тем значительнее, чем выше давление газа в корреляционной кювете радиометра.

Полученные зависимости изменения сигнала корреляционного радиометра показывают возможность определения вертикального распределения содержания метана в атмосфере по разности показаний корреляционного радиометра с набором кювет при различных давлениях исследуемого газа в них.

Представление неоднородной атмосферы в виде однородных слоев использовано при разработке методики обработки спектров, полученных при помощи современных сенсоров, установленных на спутниках, для определения вертикального распределения газового состава атмосферы.

Алгоритм определения содержания метана в атмосфере

Представим неоднородную атмосферу в виде двух однородных слоев и рассмотрим корреляционную методику определения изменения содержания исследуемого газа в интересующей области атмосферы. После подстановки соотношения (2) в (3) для

одного спектрального диапазона $\Delta\nu$ с пропуском корреляционной кюветы T_c получим

$$\Delta S = \left[(\epsilon B_e - B_{1,m}^0) \left(\int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right) + (B_{1,m}^0 - B_{2,p}^0) \times \left(\int_{\Delta\nu} T_{2,p} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{2,p} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right) \right]. \quad (4)$$

Данный выходной сигнал соответствует содержанию исследуемого газа в слоях для стандартной атмосферы. Регистрируемая спектральная светимость уходящего излучения Земли может не соответствовать выбранной стандартной модели атмосферы. Отличие концентрации искомого газа в 1, m и 2, p слое от концентрации в стандартной модели атмосферы на $\Delta n_{1,m}$, $\Delta n_{2,p}$ приводит к изменению функции пропускания слоев в $\delta T_{1,m}$, $\delta T_{2,p}$ раз: $T_{1,m} \delta T_{1,m} = \ell^{-\mu_{1,m}(n_{1,p} + \Delta n_{1,m})x_{1,m}} \approx T_{1,m}(1 - \mu_{1,m} \Delta n_{1,m} x_{1,m})$, $T_{2,p} \delta T_{2,p} = \ell^{-\mu_{2,p}(n_{2,p} + \Delta n_{2,p})x_{2,p}} \approx T_{2,p}(1 - \mu_{2,p} \Delta n_{2,p} x_{2,p})$.

Разность результатов корреляционной обработки реального (измеренного спектрометром) спектра уходящего излучения и теоретического корреляционного анализа уходящего излучения стандартной модели атмосферы представим в виде

$$\Delta S - \Delta S_{\text{ст}} \approx \Delta n_{1,m} \left[-(\epsilon B_e - B_{1,m}^0) x_{1,m} \left(\int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} T_c \mu_{1,m} d\nu + (\epsilon B_e - B_{1,m}^0) \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} \mu_{1,m} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right) + \Delta n_{2,p} \left[-(\epsilon B_e - B_{1,m}^0) x_{2,p} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} T_c \mu_{2,p} d\nu + (\epsilon B_e - B_{1,m}^0) x_{2,p} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} \mu_{2,p} d\nu \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_c d\nu - (B_{1,m}^0 - B_{2,p}^0) x_{2,p} \int_{\Delta\nu} T_{2,p} T_c \mu_{2,p} d\nu + (B_{1,m}^0 - B_{2,p}^0) x_{2,p} \times \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{2,p} \mu_{2,p} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] \right]. \quad (5)$$

Обозначим множители при $\Delta n_{1,m}$, $\Delta n_{2,p}$ буквами a , b :

$$a = \left[-(\epsilon B_e - B_{1,m}^0) x_{1,m} \left(\int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} T_c \mu_{1,m} d\nu + (\epsilon B_e - B_{1,m}^0) \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} \mu_{1,m} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right) \right], \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
b = & \left[-(\varepsilon B_e - B_{1,m}^0) x_{2,p} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} T_c \mu_{2,p} d\nu + \right. \\
& + (\varepsilon B_e - B_{1,m}^0) x_{2,p} \int_{\Delta\nu} T_{1,m} T_{2,p} \mu_{2,p} d\nu \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_c d\nu - \\
& - (B_{1,m}^0 - B_{2,p}^0) x_{2,p} \int_{\Delta\nu} T_{2,p} T_c \mu_{2,p} d\nu + (B_{1,m}^0 - B_{2,p}^0) x_{2,p} \times \\
& \left. \times \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{2,p} \mu_{2,p} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right]. \quad (7)
\end{aligned}$$

Значения a , b рассчитываются для стандартной атмосферы в выбранном спектральном участке $\Delta\nu$. Соотношение (5) можно записать в виде

$$\Delta S - \Delta S_{ст} = \Delta P \approx a \Delta n_{1,m} + b \Delta n_{2,p}. \quad (8)$$

Для двухслойной модели атмосферы и двух корреляционных кювет при разных давлениях исследуемого газа в них отклонение светимости уходящего излучения от светимости излучения для выбранной модели атмосферы ΔP_1 , ΔP_2 представим в виде системы двух уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{cases} \Delta P_1 \approx a_1 \Delta n_{1,m} + b_1 \Delta n_{2,p}; \\ \Delta P_2 \approx a_2 \Delta n_{1,m} + b_2 \Delta n_{2,p}. \end{cases} \quad (9)$$

Параметры a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , характеризующие влияние мощности уходящего излучения ΔS на изменение содержания исследуемого газа в слоях Δn_1 , Δn_2 , определяются аналитически для стандартной атмосферы $a_1 = \Delta P_1 / \Delta n_{1,m}$, $a_2 = \Delta P_2 / \Delta n_{1,m}$ при $\Delta n_{2,p} = 0$; $b_1 = \Delta P_1 / \Delta n_{2,p}$, $b_2 = \Delta P_2 / \Delta n_{2,p}$ при $\Delta n_{1,m} = 0$.

Решение системы уравнений (9) имеет вид

$$\begin{cases} \Delta n_{1,m} = \frac{\Delta P_1 - b_1 \Delta n_{2,p}}{a_1}; \\ \Delta n_{2,p} = \frac{a_1 \Delta P_2 - a_2 \Delta P_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}. \end{cases} \quad (10)$$

Случайные флуктуации мощности уходящего излучения приводят к смещению расчетного значения содержания исследуемого газа в слое. Их можно скомпенсировать, если рассмотреть модель двухслойной атмосферы с ничтожно тонким однородным нижним слоем ($\Delta n_1 \approx 0$). Для стандартной модели атмосферы находим коэффициенты a_1 , a_2 , b_1 , b_2 . Решая систему уравнений (9), при наличии помехи в обрабатываемом спектре уходящего излучения, получим $\Delta n_{1,\Phi} \neq 0$. Так как в нижнем тонком слое $\Delta n_1 \approx 0$, случайные флуктуации ΔP_1 , ΔP_2 , равные $\Delta P_{1\Phi}$, $\Delta P_{2\Phi}$, можно определить по дополнительному значению уходящего излучения, обусловленного первым членом суммы системы уравнений (9):

$$\begin{cases} \langle \Delta P_{1\Phi} \rangle \approx a_1 \Delta n_{1,\Phi}; \\ \langle \Delta P_{2\Phi} \rangle \approx a_2 \Delta n_{1,\Phi}. \end{cases} \quad (11)$$

Дальнейшие вычисления следует проводить со значениями мощности уходящего излучения, равными $\Delta P_{1,0} = \Delta P_1 - \Delta P_{1\Phi}$ и $\Delta P_{2,0} = \Delta P_2 - \Delta P_{2\Phi}$. Данная процедура позволяет также устранить часть принимаемого излучения, обусловленную наличием аэрозоля в атмосфере. Это связано с тем, что в узком спектральном диапазоне ослабляющие свойства аэрозоля слабо зависят от частоты излучения.

Последовательное увеличение толщины нижнего однородного слоя атмосферы позволяет определить изменение вертикального распределения исследуемого газа между поверхностью Земли и спутником на основе теоретически полученных значений коэффициентов системы уравнений (9), показывающих изменение спектра уходящего излучения атмосферы при изменении содержания исследуемого газа в однородном слое.

Вертикальное распределение температуры воздуха стандартной атмосферы задается априорно по результатам расчетов по известным методикам [9]. Тепловое излучение поверхности Земли неоднородно из-за рельефа, состава почвы, растительности, озер, рек, техногенных сооружений [10]. Поэтому необходимо эффективную излучаемую способность поверхности Земли определять по результатам измерения используемого регистратора уходящего излучения атмосферы.

Представим атмосферу между радиометром и поверхностью Земли в виде однородного слоя с лучеиспускательной способностью B_a и спектральной плотностью пропускания излучения T_a в выбранном спектральном участке. Среднее значение лучеиспускательной способности поверхности Земли

$$\langle \varepsilon B_e \rangle = \frac{\langle S \rangle - \langle B_a \rangle (1 - \langle T_a \rangle)}{\langle T_a \rangle}. \quad (12)$$

Использование данных регистрации радиометра в ближайшем слабопоглощающем спектральном участке от линии поглощения исследуемого газа позволит рассчитать излучательную способность поверхности Земли.

В статье [7] приведены рассчитанные для стандартной атмосферы зависимости изменения относительной разности сигналов корреляционного радиометра с кюветой с метаном под давлением 1 атм от изменения содержания CH_4 в 1-км слое атмосферы на 2,5; 5; 7,5; 10% и от высоты нахождения этого слоя. Наблюдается линейная зависимость реакции сигналов радиометра от изменения содержания метана в пограничных слоях атмосферы.

Влияние изменений параметров атмосферы на показания радиометра

В работах [11, 12] показано, что результаты измерений современных спутниковых ИК-зондировщиков в безоблачной атмосфере позволяют получать: а) профили температуры в тропосфере и в нижней стратосфере с точностью ~ 1 К с вертикальным разрешением до 1 км; б) тропосферные профили влажности с разрешением 1–2 км и точностью 10%

для относительной и 20–30% для абсолютной влажности; в) температуру подстилающей поверхности Земли с точностью ~ 1 К. Отклонение уровня относительного сигнала радиометра ΔS от среднего значения при увеличении температуры воздуха во всех однородных слоях на 1 К на высотах от 100 до 25600 м в атмосфере не превышает $8 \cdot 10^{-9}$.

Оценки показывают, что погрешность определения средней температуры поверхности Земли 0,5 К и вертикального распределения температуры воздуха 1 К изменяют значение ΔS не более чем на 1%, что ограничивает определение содержания метана в нижнем 1-км слое воздуха 2% от общего содержания его в атмосферном столбе рассматриваемой модели атмосферы.

Из проведенных расчетов следует, что суммарная погрешность обработки измерений содержания метана в вертикальном столбе атмосферы корреляционными радиометрами с аэрокосмической платформы из-за погрешностей определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности составит ~ 3%.

Заключение

Рассмотрена обработка спектра уходящего излучения атмосферы методом корреляционной спектроскопии с целью определения вертикального распределения концентрации исследуемого газа в воздухе. Атмосфера представляется в виде двух однородных слоев, и определяется отклонение содержания исследуемого газа в каждом слое от принятого стандартного вертикального распределения газа в атмосфере, приводящее к равенству расчетного и экспериментально измеренного потоков уходящего излучения. Последовательное изменение размеров слоев двухслойной модели атмосферы позволяет рассчитать содержание исследуемого газа в любом слое атмосферы. Толщина однородного слоя рассматриваемой методики обработки конкретного спектра уходящего излучения (очищенного от шумов) определяется погрешностью расчетов искомого параметра. Рассмотренный метод позволяет использовать оптимальные параметры газового и интерференционного фильтров виртуального газокорреляционного ИК-радиометра при обработке спектров, полученных спутниковыми ИК-зондировщиками высокого спектрального разрешения.

1. Tolton B.T., Drummond R.D. Characterization of the length-modulation radiometer // Appl. Opt. 1997. V. 36, N 22. P. 5409–5419.

S.A. Shishigin. Correlation spectroscopy in the analysis of the spectrum of outgoing radiation of the atmosphere.

The model of the atmosphere in the form of thin homogeneous layers is considered, which is converted into two homogeneous layers without changing the power of the outgoing radiation in the studied spectral region of the methane absorption bands $1220\text{--}1260\text{ cm}^{-1}$. The observed distortion of the spectrum of outgoing radiation of the Earth with consideration of atmospheric model in an equivalent homogeneous layer does not affect the correlation analysis. The system of equations relating changes of methane content in each of the homogeneous layers with the change of power of the outgoing radiation is given.

2. Виролайнен Я.А., Дементьев Б.В., Иванов В.В., Поляков А.В. Оптимизация параметров газо-корреляционного ИК-радиометра для измерения содержания метана в пограничном слое атмосферы с аэрокосмических платформ // Исслед. Земли из космоса. 2002. № 5. С. 1–10.
3. Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Учет рассеяния излучения в наземных газо-корреляционных измерениях общего содержания метана // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 4. С. 1–7.
4. Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход 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; Rakitin V.S., Shtabkin Yu.A., Elansky N.F., Pankratova N.V., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Safronov A.N. Comparison results of satellite and ground-based spectroscopic measurements of CO, CH₄, and CO₂ total contents // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 6. P. 533–542.
5. Баландин С.Ф., Старноеский С.А., Шишигин С.А. Анализ возможного применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере со спутника // Оптика атмосф. и океана 2008. Т. 21, № 10. С. 897–901.
6. Баландин С.Ф., Шишигин С.А. Влияние параметров атмосферы на измерения содержания углекислого газа в воздухе корреляционным ИК-радиометром со спутника // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 1–7.
7. Шишигин С.А. Методика определения содержания метана в атмосфере с помощью корреляционного радиометра // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 5. С. 3–8.
8. Баландин С.Ф., Шишигин С.А. Основные параметры корреляционного ИК-радиометра для измерения содержания закиси азота в атмосфере со спутника // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 256–260.
9. Лагутин А.А., Мордвин Е.Ю., Шмаков И.А. Содержание метана в тропосфере Западной Сибири по данным AIRS/Aqua // Изв. АГУ. 2012. Т. 1, № 1, вып. 73. С. 191–196.
10. Бабченко С.В., Матвиенко Г.Г., Суханов А.Я. Оценка возможностей зондирования парниковых газов CH₄ и CO₂ над подстилающей поверхностью IPDA лидаром космического базирования // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 1. С. 37–45; Babchenko S.V., Matvienko G.G., Sukhanov A.Ya. Assessing the possibilities of sensing CH₄ and CO₂ greenhouse gases above the underlying surface with satellite – based IPDA lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 3. P. 245–253.
11. Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н. Проблемы и перспективы анализа и использования данных спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 5. С. 18–33.
12. Успенский А.Б., Кухарский А.В., Рублев А.Н. Детектирование тропосферных вариаций CO₂ по данным спутникового ИК-зондировщика высокого спектрального разрешения // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 4. С. 42–51.