

Анализ возможного применения метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере со спутника

С.Ф. Баландин¹, С.А. Старновский^{1,2}, С.А. Шишигин^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

Поступила в редакцию 10.03.2008 г.

Проведен анализ эффективности использования пассивного метода корреляции газовых светофильтров для измерения содержания метана в атмосфере в различных спектральных интервалах. Исследовано влияние атмосферных газов (H₂O, N₂O) и температуры воздуха на погрешность этих измерений. Определена оптимальная концентрация метана в корреляционной кювете аэрокосмического радиометра для измерения общего содержания метана в атмосфере.

Ключевые слова: метан, атмосфера, спутник, метод, корреляция, спектроскопия.

Введение

Накопление в воздухе парниковых газов CO₂, CH₄, H₂O, N₂O, имеющих полосы поглощения в инфракрасной области спектра, приводит к изменению радиационных свойств атмосферы. Этот процесс инициирует таяние вечной мерзлоты, что существенно увеличивает эмиссию метана из болот субарктической зоны и накоплению его в атмосфере [1]. Поэтому разработка оперативных методов мониторинга газового состава атмосферы с использованием космических аппаратов является актуальной проблемой атмосферной оптики, экологии, климатологии.

В настоящее время разработаны методы определения вертикальных профилей атмосферных газов, основанные на ослаблении излучения атмосферными газами в диапазоне 600–2000 см⁻¹ со спектральным разрешением 0,1–0,5 см⁻¹, позволяющие восстанавливать вертикальные профили и полное содержание в атмосферном столбе различных парниковых газов [2, 3].

Для практической реализации данных методик на спутниках использовались сенсоры нового поколения: IMG, AIRS, TES, SCIAMACHY, IASI. При этом вертикальный профиль метана восстанавливается расчетным путем, исходя из измеренных спектров яркости уходящего теплового излучения Земли (IMG, AIRS, TES, IASI) или спектров поглощения атмосферой солнечного излучения в ИК-области (SCIAMACHY). Наиболее удачным из работающих на орбите в 2005–2006 гг. сенсоров метана оказался AIRS (NASA). Это решеточный спектрометр с 2378

спектральными каналами в диапазоне 3,7–15,4 мкм и разрешением ~0,5 см⁻¹.

Метод корреляционной спектроскопии является одним из перспективных для аэрокосмического мониторинга атмосферы [4]. Для практического использования данного метода как при обработке спектров излучения, регистрируемых орбитальными сенсорами высокого разрешения, так и разработке необходимой аппаратуры, базирующейся на спутнике, требуется предварительный выбор оптимальных рабочих спектральных интервалов, в которых обеспечивается максимальная чувствительность прибора. В настоящей статье рассмотрены основные параметры оптической схемы корреляционного радиометра для определения содержания метана в атмосфере со спутника.

Метод корреляции газовых светофильтров для вертикальных атмосферных трасс

В методе корреляции газовых светофильтров излучение, принимаемое из исследуемого объема, разделяется на два канала — опорный и корреляционный. В корреляционном канале находится кювета с искомым газом. По отношению разности сигналов фотоприемников каждого канала к их сумме определяют содержание искомого газа в исследуемом объеме.

Согласно модели однородных слоев многослойной атмосферы полную энергетическую светимость $N(\nu)$, воспринимаемую оптическим прибором надирного типа с летательного аппарата, представим в виде

$$N(\nu) = \varepsilon B_e(\nu, \theta_e) \prod_{i=1}^n e^{-\tau_i(\nu)} + \sum_{i=1}^n B_{a_i}(\nu, \theta_a) \times$$

* Сергей Флавинович Баландин (bal@iao.ru); Сергей Александрович Старновский; Сергей Алексеевич Шишигин.

$$\times (1 - e^{-\tau_i(v)}) \prod_{k=i+1}^{n-1} e^{-\tau_k(v)}, \quad (1)$$

где ε – относительная излучательная способность (степень черноты) поверхности Земли; $B(\nu, \theta)$ – светимость абсолютно черного тела с температурой θ на частоте ν ; индекс e относится к Земле, индекс a относится к атмосфере; n – число рассматриваемых последовательных однородных горизонтальных слоев атмосферы; $\tau_i(\nu)$, $\tau_k(\nu)$ – оптическая толщина i -го или k -го слоя атмосферы. Солнечной радиацией пренебрегаем.

Разность сигналов фотоприемников ΔS в двух каналах прибора, основанного на методе корреляции газовых светофильтров, равна [5]:

$$\Delta S = \Omega \int_{\Delta\nu} [\eta_c N(\nu) e^{-\tau_c(\nu)} - \eta_r N(\nu) e^{-\tau_r(\nu)}] d\nu + J_c, \quad (2)$$

где η_c и η_r – коэффициенты пропускания оптических компонентов в корреляционном и опорном каналах; Ω – угловой аксептанс; $\tau_c(\nu)$ и $\tau_r(\nu)$ – оптические толщины газов в корреляционном и опорном каналах; J_c – слагаемое, обусловленное излучением, испускаемым газом корреляционной кюветы. Подставим (1) в (2) и с учетом соотношения балансировки каналов [5] (выравнивания сигналов фотоприемников при отсутствии измеряемого газа в исследуемом объеме)

$$\eta_c \int_{\Delta\nu} e^{-\tau_c(\nu)} d\nu = \eta_r \int_{\Delta\nu} e^{-\tau_r(\nu)} d\nu$$

получим

$$\frac{\Delta S}{\eta_c \Omega} = (\varepsilon B_e - B_{a_1}) \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \sum_{i=1}^{n-1} (B_{a_i} - B_{a_{i+1}}) \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + J_c, \quad (3)$$

где $T_c = e^{-\tau_c(\nu)}$, $T_{a_i} = \prod_{k=i}^n e^{-\tau_k}$.

Аналогичные расчеты для суммы сигналов фотоприемников $S_1 + S_2$ позволяют записать калибровочную функцию, определяемую как отношение разности регистрируемых сигналов в каждом из каналов корреляционного спектрометра к их сумме для неоднородной атмосферы, в виде

$$\frac{\Delta S}{S_1 + S_2} = \frac{\left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{a_i} - B_{a_{i+1}})}{(\varepsilon B_e - B_{a_1})} \times \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + J_c}{\left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu + \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (B_{a_i} - B_{a_{i+1}})}{(\varepsilon B_e - B_{a_1})} \times \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu + \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + J_c}$$

$$\times \left[\int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu + \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right] + \frac{2B_{a_n} \int_{\Delta\nu} T_c d\nu}{(\varepsilon B_e - B_{a_1})} \}. \quad (4)$$

Последние слагаемые в числителе и знаменателе обусловлены тепловым излучением газовой кюветы, поверхности Земли и первого и последнего рассматриваемых слоев и не несут информации об искомом газе. Поэтому данные слагаемые компенсируются путем вычитания из сигнала газовой кюветы некоторой доли сигнала, соответствующего величинам этих слагаемых, которые можно теоретически рассчитать при известном распределении температуры в атмосфере и характеристик газовой кюветы. Методика экспериментальной компенсации влияния указанных членов рассмотрена в работе [5] и в последующих расчетах их не учитываем.

Проведем упрощения выражений (3), (4) для анализа применения метода корреляции газовых светофильтров при измерении содержания метана в атмосфере со спутника.

Атмосфера, в которой температура линейно понижается с высотой, называется политропной. Изменение температуры θ с высотой z в тропосфере удовлетворяет соотношению $\theta = \theta_0 - \gamma z$, которое используется при построении «стандартной атмосферы» ($\gamma = \text{const}$, θ_0 – температура воздуха у поверхности Земли). В стандартной атмосфере плотность воздуха ρ , концентрация N хорошо перемешанных газов (в частности, метана) изменяются с высотой по закону $\rho = \rho_0 [(\theta_0 - \gamma z)/\theta_0]^{(g/R\gamma) - 1}$, где ρ_0 – плотность воздуха у поверхности Земли; g – ускорение свободного падения; R – газовая постоянная.

При малой оптической толщине поглощающего слоя газа в исследуемом объеме по сравнению с оптической толщиной поглощающего слоя данного газа в корреляционной кювете, согласно результатам работы [6] и проведенным расчетам (см. далее рис. 2), можно считать линейной зависимость корреляционного соотношения

$$\Delta S_{i+1}^* = \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_{i+1}} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu$$

от общей массы метана, над слоем i в атмосфере. Вклад данных корреляционных соотношений в выражении (4) пропорционален массе метана над каждым слоем. Разность содержания метана $\Delta\mu$ в слоях i и $i+1$, исходя из высотного распределения концентрации газа, можно представить в виде

$$\Delta\mu \approx \mu_0 \left[1 - \frac{\Delta z}{2\theta_0} \left(\frac{g}{R} - \gamma \right) \right],$$

где μ_0 – содержание метана в нижнем слое атмосферы. Относительно общего содержания метана в атмосфере M_0 содержание метана в последующих слоях уменьшается приблизительно в $e^{-\mu_0/M_0}$ раз. Разность сигналов (3) двух каналов приемника излучения можно представить в виде

$$\frac{\Delta S}{\eta_c \Omega (\varepsilon B_e - B_{a_1})} \approx \Delta S_1^* \left(1 + \frac{\alpha_{\text{эф}}}{1 - e^{-\frac{\mu_0}{M_0}}} \right) + J_c, \quad (5)$$

где $\alpha_{эф} \approx 0,5 \div 0,7$ – усредненное значение соотношений $(B_{a_i} - B_{a_{i+1}}) / (\epsilon B_e - B_{a_i})$. Слагаемое $\alpha_{эф} / (1 - e^{-\mu_0/M_0}) \approx 1,9 \div 2,7$ (при $\mu_0/M_0 = 0,3$) соответствует вкладу теплового излучения однородных слоев атмосферы в разность информационных сигналов в неоднородной атмосфере. Уменьшение толщины однородных слоев приводит к увеличению их числа для описания пропускания всей толщи атмосферы, повышению точности расчетов. Однако основные закономерности влияния других газов и температуры воздуха на погрешность измерения содержания метана в атмосфере описываются подобными корреляционными членами ΔS_1^* .

С учетом компенсации вклада последних слагаемых и упрощений при получении соотношения (5) значения аппаратной функции, описывающей калибровочную кривую прибора, представим в виде

$$\frac{\Delta S}{S_1 + S_2} \approx \frac{\left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu - \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right]}{\left[\int_{\Delta\nu} T_{a_1} T_c d\nu + \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\Delta\nu} T_{a_1} d\nu \int_{\Delta\nu} T_c d\nu \right]} \quad (6)$$

Анализ оптимальных условий для измерения содержания метана в атмосфере корреляционным методом

В спектральных участках полос поглощения метана (1,65; 2,5; 3,5 мкм) тепловое излучение поверхности Земли более чем на два порядка меньше, чем в области 8 мкм, а также сильно изменяется в зависимости от типа поверхности Земли, поэтому более удобной для применения пассивного метода корреляции газовых светофильтров является полоса поглощения метана 8 мкм.

Плотность мощности солнечного излучения в спектральном диапазоне 8–8,25 мкм вне атмосферы составляет 0,16 Вт/м². В этой области спектра тепловое излучение Земли близко по своим характеристикам к излучению абсолютно черного тела [7]. Светимость излучения поверхности Земли при температуре 300 К в том же спектральном диапазоне составляет 1,12 Вт/м². В рассматриваемом участке спектра доля отраженного и рассеянного солнечного излучения от поверхности Земли в уходящей радиации из атмосферы мала, что позволяет не учитывать ее при измерениях в любое время суток. Ослабление данного излучения атмосферными дымками минимально по сравнению с ослаблением в остальных

рассматриваемых спектральных полосах (коэффициент ослабления дымки при метеорологической дальности видимости 10 км составляет тысячные доли на километр) [8].

На спектр пропускания атмосферных газов в участке спектра 8–8,5 мкм оказывают основное влияние метан (CH₄), пары воды (H₂O), закись азота (N₂O) [9]. Концентрация водяного пара в приземном слое атмосферы может изменяться в зависимости от времени и места в пределах от 0 до 7%. В приземном слое 0–2 км содержится около 55% всего количества водяного пара. В слое 0–5 км – 90%. В верхней тропосфере ~10%. В стратосфере количество водяного пара составляет десятые и даже сотые доли процента интегрального влагосодержания атмосферы [10].

Метан хорошо перемешан в тропосфере. Концентрация его в южном полушарии на 3% меньше, чем в северном. Общее число молекул метана в столбе атмосферы M_0 составляет около $3,6 \cdot 10^{19}$ мол./см². Сезонные вариации содержания метана в атмосферном столбе на территории Западной Сибири достигают 7% [1].

Закись азота N₂O присутствует во всей тропосфере и даже проникает в нижнюю стратосферу.

Расчеты спектров ослабления атмосферных газов производились с использованием информационной системы «СПЕКТРА» ИОА СО РАН. Спектральное разрешение в расчетах составляло 0,01 см⁻¹.

Для оценки погрешности измерения содержания метана во всей толще атмосферы была выбрана модель атмосферы, разделенная на слои: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40 км.

В таблице даны средние значения температуры, давления, концентрации и процентного содержания молекул в выбранных слоях атмосферы.

На рис. 1 приведена спектральная зависимость молекулярных коэффициентов пропускания излучения вертикальной трассой всей атмосферы в спектральном диапазоне 1200–1420 см⁻¹.

Анализ данных коэффициентов пропускания излучения газами атмосферы показал, что перспективными спектральными диапазонами (наличие сильных линий поглощения метана при минимальном ослаблении излучения другими газами) для измерения содержания метана во всей толще атмосферы корреляционным методом являются 1220–1260 и 1298–1305 см⁻¹.

Зависимость корреляционного соотношения ΔS_1^* от относительного количества молекул метана M на исследуемой трассе (относительно $M_0 = 3,6 \cdot 10^{19}$ мол. метана в вертикальном столбе атмосферы сечения 1 см²)

$H_{атм}$, км	θ , К	P , атм	N_r , 10^{19} см ⁻³	N ₂ , %	O ₂ , %	CH ₄ , 10^{-3} %	O ₃ , 10^{-5} %	CO, 10^{-4} %	CO ₂ , %	N ₂ O, 10^{-4} %	H ₂ O, 10^{15} см ⁻³
0–5	274	0,764	2,02	77,665	21	0,161	0,31	0,26	0,036	0,29	263
5–10	236	0,384	1,18	78,665	21	0,161	0,445	0,08	0,036	0,28	23,6
10–20	220	0,174	0,58	78,958	21	0,15	4,83	0,03	0,034	0,24	0,45
20–30	221	0,033	0,11	78,965	21	0,159	38,64	0,011	0,034	0,2	0,0047
30–40	238	0,0076	0,023	78,963	21	0,14	93,48	0,013	0,035	0,093	0,0013

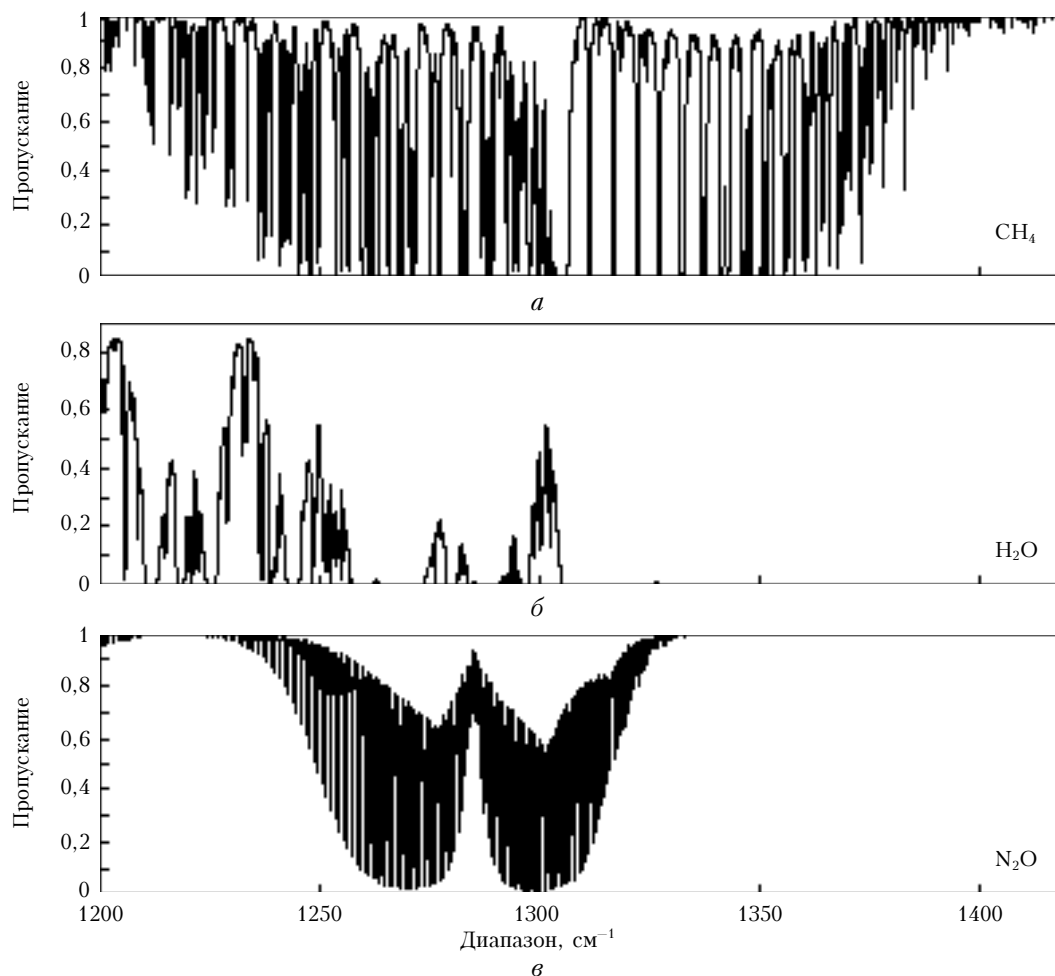


Рис. 1. Спектральная зависимость молекулярных коэффициентов пропускания излучения вертикальной трассой всей атмосферы газами: *a* – метаном CH_4 ; *б* – водяным паром H_2O ; *в* – закисью азота N_2O

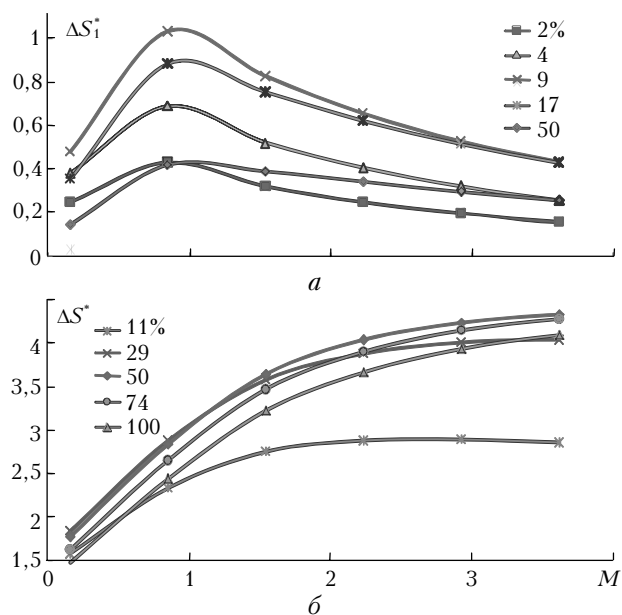


Рис. 2. Зависимость корреляционного соотношения ΔS_1^* от относительной массы метана на исследуемой трассе при разных концентрациях метана в корреляционной кювете длиной 10 см для спектральных участков: *a* – 1298–1305 cm^{-1} ; *б* – 1220–1260 cm^{-1}

при разных концентрациях метана (2, 4, 9, 11, 17, 29, 50, 74, 100%) в корреляционной кювете длиной 10 см (давление 1 атм) для спектральных участков 1298–1305 cm^{-1} (*a*) и 1220–1260 (*б*) приведена на рис. 2. Чувствительность метода значительно выше в спектральном диапазоне 1220–1260 cm^{-1} , чем во втором участке. Оптимальные концентрации метана в корреляционных кюветах данных участков спектра составляют ~ 50 и ~ 10% соответственно. Максимального значения корреляционное соотношение ΔS_1^* достигает в спектральном диапазоне 1220–1260 cm^{-1} при относительной массе измеряемого газа ~ 3, а при измерении содержания метана в вертикальном столбе всей атмосферы ($M = 1$) наблюдается линейная зависимость корреляционного соотношения от количества метана.

Корреляционное соотношение в спектральном участке 1298–1305 cm^{-1} имеет максимальное значение при атмосферном содержании метана в корреляционной кювете, что затрудняет использование в данном диапазоне метода корреляционной спектроскопии для измерения метана в атмосфере со спутника.

На рис. 3 и 4 показана зависимость аппаратурной функции (6) в спектральном диапазоне 1220–1260 cm^{-1} при оптимальной концентрации метана в корреляционной кювете (50%) от относительной

массы M метана в атмосфере при изменении влажности и температуры воздуха.

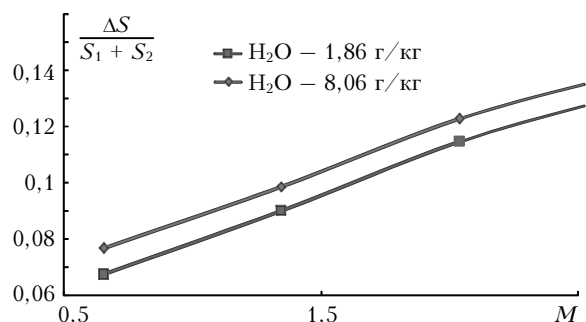


Рис. 3. Зависимость аппаратной функции от концентрации метана в атмосфере в спектральных диапазонах 1220–1260 см^{-1} при удельной влажности 1,86 и 8,06 г/кг в нижнем 5-километровом слое

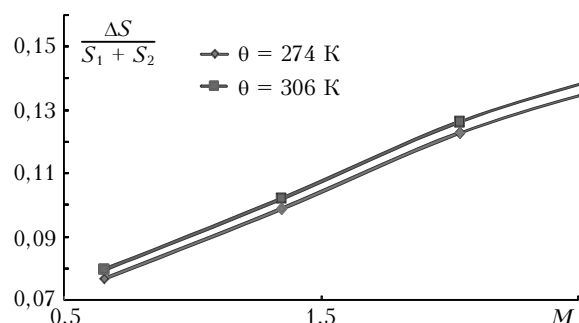


Рис. 4. Зависимость аппаратной функции от концентрации метана в атмосфере в спектральных диапазонах 1220–1260 см^{-1} при температуре воздуха 274 и 306 К в нижнем 5-километровом слое

Результаты расчетов показывают, что неучет в нижнем 5-километровом слое изменения средней удельной влажности от 1,86 (зима) до 8,06 г/кг (лето) приводит к относительной погрешности измерения содержания метана в атмосфере $\sim 10\%$. Использование сезонных среднестатистических профилей вертикального распределения удельной влажности воздуха [11] со среднеквадратическими отклонениями менее 1 г/кг для безоблачной погоды позволяет снизить влияние влажности на погрешность измерения метана до 1%.

Изменение средней в нижнем 5-километровом слое температуры воздуха на 32 К вносит в погрешность измерения метана $\sim 3,5\%$, эта погрешность снижается пропорционально погрешности задания температуры воздуха. Влияние изменения концентрации N_2O в воздухе на 5% вносит в погрешность измерения метана менее 0,2%.

Заключение

Как показывают оценки, относительная погрешность измерений содержания метана во всем столбе атмосферы корреляционным газоанализатором аэрокосмического базирования может достигать 2% при использовании сезонных моделей вертикального распределения параметров атмосферы, описывающих распределение температуры и удельной влажности воздуха с погрешностью 5 К и 1 г/кг соответственно.

Пассивный метод дистанционного корреляционного газоанализа может использоваться в спектральном участке спектра 1220–1260 см^{-1} для оперативного измерения метана в атмосфере при решении задач экологического мониторинга.

1. Грибанов К.Г., Имасу Р., Топтыгин А.Ю., Блойтиен В., Наумов А.В., Захаров В.И. Метод и результаты по определению метана в атмосфере Западной Сибири из данных сенсора AIRS // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 10. С. 881–886.
2. Кашин Ф.В., Каменогородский Н.Е., Гречко Е.И., Джолла А.В., Поберовский А.В., Макарова М.В. Сравнение различных методик спектроскопических измерений общего содержания метана в атмосфере // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 339–345.
3. Петров С.Б., Смирнов А.П. Тенденции развития спектральной аэрокосмической аппаратуры для исследования и оперативного контроля окружающей среды // Оптик. ж. 2000. Т. 67. № 5. С. 82–93.
4. Бузников А.А. Методы и аппаратура дистанционного зондирования для глобального экологического мониторинга // Оптик. ж. 1992. № 8. С. 6–11.
5. Ли Н.С., Цвик Н.Н. Приборы для дистанционного обнаружения течей в газопроводах, основанный на принципе корреляции газовых светофильтров // Приборы для экспериментальных исследований. 1985. № 9. С. 132–140.
6. Дунаев В.Б. Аналитические методы и устройства корреляционной спектроскопии. Препр. / Ин-т физ. АН БССР (Минск). 1990. № 614. 33 с.
7. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1965. 876 с.
8. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 496 с.
9. Киселева М.С., Казбанов В.А., Решетникова И.Н., Синельникова Г.Е., Голованов С.Н. Высотные спектры прозрачности атмосферы в области 8,0–12,0 мкм: Эксперимент и расчет // Оптик. ж. 1998. Т. 65. № 11. С. 28–33.
10. Седунов Ю.С., Авдюшин С.И., Борисенков Е.П., Волковицкий О.А., Петров Н.Н., Рейтенбах Р.Г., Смирнов В.И., Черников А.А. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеониздат, 1991. 509 с.
11. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 320 с.

S.F. Balandin, S.A. Starnovskii, S.A. Shishigin. Analysis of possible application of the gas light filter correlation method to space measuring of methane content in the atmosphere.

The efficiency of usage of a passive method of a correlation of gas light filters for measuring the content of methane in an atmosphere in different spectral intervals are analysis. Is explored influences of atmospheric gases (H_2O , N_2O) and temperature of air on an error of these measurings. The optimal concentration of methane in a correlation dish of a space radiometer for measuring the blanket content of methane in an atmosphere is spotted.