

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ
И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

УДК 528.873.041.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОКОРРЕЛЯЦИОННОГО
ИК-РАДИОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА
В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ
С АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ПЛАТФОРМ**

© 2002 г. Я. А. Виролайнен*, Б. В. Дементьев, В. В. Иванов, А. В. Поляков

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

**Санкт-Петербургский государственный университет*

**Тел.: (812) 428-43-47; e-mail: Yana.Virolainen@pobox.spbu.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2002 г.

Предложен алгоритм оптимизации параметров селективных элементов газокорреляционного ИК-радиометра для определения содержания примесей в приземных слоях атмосферы по измерениям отраженного земной поверхностью солнечного излучения. Особенностью алгоритма является учет шумов измерительного прибора и помех, обусловленных вариациями содержания посторонних газов во всей толще атмосферы, а также исследуемого газа вне заданного для измерений слоя, как суммарного эффективного шума. Показано, что потенциальная точность надирных измерений содержания метана в слое 0–4 км при оптимальных параметрах газового и интерференционного фильтров прибора составляет 5–10% от фонового содержания в слое свободной атмосферы лета средних широт. Указанная точность имеет место при зенитных углах Солнца 30°–70° и альбедо земной поверхности 0.1–0.25. Она может быть реализована при времени одного измерения 0.5 с и при использовании обычного приемника излучения с термоэлектрическим охлаждением.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимый этап разработки аппаратуры для дистанционных измерений параметров атмосферы – численное моделирование эксперимента с учетом априорной информации об объектах исследования и основных параметров измерительного прибора. В первую очередь это относится к нетрадиционным методам дистанционного зондирования (ДЗ) атмосферы, каковым является газокорреляционная ИК-радиометрия [1]. Особенностью этого метода является наличие в измерительном приборе селективного оптического элемента – модулируемого газового фильтра, обеспечивающего сверхвысокое спектральное разрешение при большой светосиле и умеренных весогабаритных характеристиках прибора.

Метод газокорреляционной радиометрии, используемый до настоящего времени в основном за рубежом, в последние годы получил существенное развитие, связанное с его применением для спутниковых измерений содержания важнейших компонентов атмосферы в ее приземном слое, наименее доступном для исследований с больших высот. К таким компонентам относятся парниковый газ метан и окись углерода, играющие ключевую роль в радиационном балансе Земли и химии тропосферы.

О высокой информативности метода газокорреляционной ИК-радиометрии при исследовании

нижних слоев тропосферы свидетельствуют результаты модельных расчетов его потенциальной чувствительности, проведенных в работе [2] для определения содержания CO и CH₄ по отраженному земной поверхностью солнечному излучению. Сделанные авторами этой работы оценки относятся к конкретному газовому фильтру [3, 4]. Вопросам же обоснования и, тем более, оптимизации параметров фильтра с точки зрения точности газокорреляционных измерений, на наш взгляд, уделено недостаточно внимания.

В настоящем исследовании, являющемся подготовительным этапом опытно-конструкторской разработки бортового газокорреляционного ИК-радиометра для исследования регионального распределения CH₄ в пограничном слое атмосферы, делается попытка восполнить указанный пробел.

ГАЗОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ РАДИОМЕТР

Газокорреляционный радиометр выделяет из общего спектра нескольких атмосферных газов линии исследуемого компонента за счет использования в приборе селективного элемента – ячейки газового фильтра. Эта ячейка заполняется корреляционным газом, аналогом исследуемого компонента. Относительно высокая чувствительность прибора определяется тем, что на приемнике излучения одновременно суммируется информация о множестве линий исследуемого газа, входящих в

рабочую область спектра. Она определяется вторым селективным элементом прибора – интерференционным фильтром. Заданием оптической толщины ячейки с корреляционным газом (давления и длины хода луча) и периодическим изменением (модуляцией) оптической толщины прибор настраивается на измерения исследуемого газа в конкретном слое атмосферы (определенном диапазоне высот над земной поверхностью и соответствующем диапазоне давлений). В каждом цикле модуляции из суммарного сигнала на выходе прибора выделяются два взаимодополняющих типа сигналов – разностный и средний. Разностный сигнал S_D определяется амплитудой изменения оптической толщины корреляционного газа. Он содержит информацию об исследуемом газе, а также информацию об условиях фона (прошедшее через атмосферу излучение земной поверхности или внешнего источника зондирующего сигнала, поглощение или излучение посторонних газов и т.д.), содержащуюся в узких интервалах спектральных линий исследуемого газа. Сигнал S_A определяется средним за период модуляции значением оптической толщины корреляционного газа. Он содержит главным образом информацию о тех же условиях фона, но во всем рабочем диапазоне длин волн, включая его прозрачные (вне линий исследуемого газа) участки. Для определения содержания газа в заданном слое атмосферы используется отношение этих сигналов $\Phi = S_D/S_A$, в большинстве случаев нечувствительное к фону и его спектральным особенностям.

Разностный и средний сигналы, приведенные ко входу приемника излучения, выражаются следующими соотношениями:

$$S_D = \dot{\eta} e_1 e_2 \int_{\Delta v} I \uparrow (v, h_{\text{sound}}) \times \\ \times T(v) [H_1(v) - H_2(v)] dv;$$

$$S_A = (\dot{\eta} e_1 / 2) \int_{\Delta v} I \uparrow (v, h_{\text{sound}}) \times \\ \times T(v) [H_1(v) + H_2(v)] dv,$$

где $I \uparrow (v, h_{\text{sound}})$ – регистрируемое излучение на входе прибора, расположенного на высоте h_{sound} ; Δv – область спектрального пропускания прибора; $H_1(v)$, $H_2(v)$ – зависимости от волнового числа v коэффициентов пропускания корреляционного газа, соответствующие минимальному и максимальному значениям его оптической толщины в периоде модуляции; $T(v)$ – пропускание фильтра, задающего Δv ; $\dot{\eta}$ – коэффициент пропускания оптических элементов прибора; e_1 , e_2 – к.п.д. высокочастотного (прерывающего сигнал на входе прибора) и низкочастотного (изменяющего оптическую толщину ячейки) модуляторов излучения.

Газовый фильтр

Работу канала разностного сигнала прибора удобно рассматривать, используя понятие эффективного фильтра (ЭФ), т.е. селективного спектрального фильтра, который образует кювета с корреляционным газом в результате модуляции ее оптической толщины. Спектр пропускания ЭФ, определяемый разностью $H_1(v) - H_2(v)$, отличен от нуля в серии узких интервалов, совпадающих с теми участками контуров линий корреляционного газа, где имеет место заметное изменение его коэффициента поглощения за период модуляции. При модуляции оптической толщины газа давлением при постоянной длине кюветы варьируется ширина спектральных линий корреляционного газа, и пропускание ЭФ отлично от нуля по обе стороны от центров линий на уровне их полуширины [1]. При модуляции длины хода луча в кювете при фиксированном давлении интервалы пропускания ЭФ сдвигаются к “крыльям” спектральных линий [2].

Для измерений содержания газа в приземных слоях атмосферы при наблюдениях с самолетов или спутников информативными являются участки спектральных линий с малым поглощением. В этом случае необходима модуляция длины хода луча в кювете.

Интерференционный фильтр

Измерение содержания примеси в пограничном слое атмосферы с аэрокосмических носителей производится по отраженному земной поверхностью солнечному излучению, прошедшему сквозь атмосферу. Выбираются участки ближнего ИК-диапазона длин волн (1–3 мкм). Здесь яркость отраженного солнечного излучения существенно превышает собственное тепловое излучение атмосферы и земной поверхности, которое не несет полезной информации при отсутствии достаточно разности радиационных температур Земли и прилегающего к ней слоя атмосферы. Более того, присутствие в сигнале теплового излучения в данном случае существенно затрудняет обработку информации.

Рабочий диапазон длин волн задается интерференционным фильтром, устанавливаемым на входе прибора или перед приемником излучения. Например, в работе [5] для измерений содержания метана предлагается фильтр с границами (по уровню 0.5) полосы пропускания 2.22 и 2.3 мкм. Использование такого фильтра, по нашему мнению, оптимально с точки зрения влияния других атмосферных газов, главные из которых водяной пар и закись азота.

Варьируемые параметры

Важными параметрами газового фильтра в рассматриваемом нами методе модуляции являются минимальное (L_1) и максимальное (L_2) значения толщины кюветы газового фильтра, а также глубина модуляции, определяемая отношением $[(L_2 - L_1)/(L_2 + L_1)]$. Из предварительных рассмотрений следует, что величина пропускания ЭФ в пределах контуров линии корреляционного газа растет с увеличением глубины модуляции, а спектральные интервалы пропускания увеличиваются с ростом максимального значения модулируемого параметра (давления или толщины кюветы). Поэтому резервом повышения точности измерений является увеличение глубины модуляции и толщины газового фильтра. Однако имеются следующие обстоятельства, требующие более детального рассмотрения данного вопроса.

А). Концентрация метана в свободной атмосфере относительно мало изменяется с изменением высоты, оставаясь постоянной примерно до уровня 14–15 км. Присутствие исследуемого газа в слоях атмосферы, расположенных выше интересующего нас слоя 0–4 км, следует отнести к помехе. Эта помеха подавляется при уменьшении глубины модуляции, так как немодулируемая часть объема корреляционного газа уменьшает пропускание ЭФ в центрах спектральных линий, несущих информацию о верхних слоях атмосферы.

Б). При возрастающей оптической толщине газового фильтра и соответствующем расширении границ пропускания ЭФ от центров спектральных линий корреляционного газа увеличивается влияние посторонних газов в атмосфере, линии которых находятся в рабочей области спектра прибора. Одновременно уменьшается приращение полезной информации, так как интервалы пропускания ЭФ выходят за пределы спектральных линий исследуемого газа.

В). Большая толщина кюветы газового фильтра при заданных размерах апертуры прибора может ограничивать его поле зрения. В связи с этим практический интерес представляет исследование возможности использования кювет при повышенном давлении содержащегося в них газа вместо кювет большой толщины.

При оптимизации параметров кюветы с корреляционным газом целесообразно использовать в качестве первого приближения приведенные, например, в работе [5] характеристики интерференционного фильтра. Эти характеристики использовались в указанной работе для оценок чувствительности конкретного прибора, в котором толщина кюветы с метаном изменяется от $L_1 = 4$ до $L_2 = 20$ мм (глубина модуляции 66%) при давлении 800 мб. Поэтому на конечном этапе оптимизации параметров рассматриваемого нами прибора требуется уточнение характеристик широкополос-

ного фильтра и проведение расчетов погрешностей измерений при его оптимальных параметрах.

Пропускание интерференционного фильтра задается приближением Баттервода [6]:

$$T(\nu) = T_0(\Delta\nu/2)^6 / [(\Delta\nu/2)^6 + (\nu - \nu_0)^6].$$

Здесь ν_0 – волновое число центра полосы пропускания фильтра; T_0 – коэффициент пропускания в центре полосы; $\Delta\nu$ – ширина полосы по уровню 0.5 от максимума пропускания.

В принятых обозначениях параметры фильтра, рассмотренного в работе [5], имеют следующие величины: $T_0 = 0.53$, $\nu_0 = 4424.7 \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu = 140.4 \text{ см}^{-1}$.

Таким образом, варьируемыми в процессе оптимизации параметрами являются максимальная в периоде модуляции толщина кюветы газового фильтра, давление заключенного в ней газа, глубина модуляции толщины кюветы, спектральная ширина и центр полосы пропускания интерференционного фильтра.

Заданные параметры

В качестве исходных данных для расчетов в первую очередь рассматриваются характеристики приемников излучения, обладающих достаточно высокой чувствительностью и не требующих глубокого охлаждения. Такими приемниками для интересующей нас области спектра являются, например, фотосопротивления из сульфида свинца и арсенида индия или селенида свинца. Эти приемники имеют детектирующую способность D^* , примерно равную $3 \times 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ (PbS) и $10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ (InAs, PbSe) на длине волны 2.2 мкм при двух- или трехкаскадном термоэлектрическом охлаждении до температуры 210–230 К.

Одним из преимуществ приемников из InAs и PbSe является сравнительно малая (до мкс) постоянная времени и, как следствие, возможность проведения большого числа отсчетов величин S_D , S_A и получения соответствующих величин $\Phi = S_D/S_A$ с последующим их усреднением за короткий промежуток времени одного измерения. Это может уменьшить ошибку определения содержания газа, связанную с эффектом “спектрального смаза”, т.е. смены за время одного измерения в поле зрения прибора участков земной поверхности, существенно отличающихся по спектральной зависимости коэффициента отражения. Очевидное преимущество приемника PbS – более высокая чувствительность. Однако существенно большая постоянная времени этого приемника позволяет его использовать лишь при относительно малых скоростях пространственного сканирования и однородных условиях наблюдений.

Коэффициент пропускания прибора η принимается равным 0.5 (линзы, зеркала, окна кюветы газового фильтра в отсутствии газа). К.п.д. модуляторов сигнала имеют величину $e_1 = e_2 = 0.3$. Геометрический фактор рассматриваемого нами прибора, получаемый умножением телесного угла поля зрения на площадь апертурной диафрагмы, составляет $G = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ ср}$.

При использовании приемника из InAs или PbSe и учете вышеуказанных параметров оптической схемы пороговая чувствительность прибора в каналах D и A соответственно равна $NER_D = 6 \times 10^{-2} \text{ мВт м}^{-1} \text{ ср}^{-1}$, $NER_A = 1.8 \times 10^{-2} \text{ мВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$ при времени единичного измерения $t = 0.5 \text{ с}$. Указанные значения пороговой чувствительности приняты нами для дальнейших расчетов.

Отметим, что при моделировании газокорреляционных измерений содержания метана в нижней тропосфере, проведенном в [3] и ориентированном на использование газового фильтра [4], за основу принят охлаждаемый до температуры 100 К приемник излучения из антимида индия ($D^* = 1.3 \times 10^{12} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$) и энергетическая чувствительность прибора в канале D , равна $NER_D = 6 \times 10^{-3} \text{ мВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$. Величины параметров η , e_1 , e_2 , G , t этого прибора примерно соответствуют рассматриваемому в настоящей статье, что позволяет сравнить их с точки зрения эффективности газовых фильтров, несмотря на существенное различие приемников излучения.

РАДИАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ

Для анализа влияния на точность измерений параметров селективных элементов прибора и их оптимизации необходимо моделирование сигналов на выходе радиометра. С этой целью разработана радиационная модель системы “атмосфера–земная поверхность” и соответствующие ей алгоритмы и программы, опирающиеся в целом на предложенную нами ранее для расчета теплового излучения атмосферы модель [6]. Алгоритмы были адаптированы для расчета отраженного поверхностью Земли солнечного излучения в диапазоне волновых чисел 3800–4800 см^{-1} , заведомо превышающем ширину рабочего участка спектра. Помимо поглощения молекулами CH_4 , учитывается также селективное поглощение молекул таких атмосферных газовых составляющих, как H_2O , O_3 , N_2O , CO и CO_2 . Кроме того, радиационная модель учитывает континуальное поглощение водяного пара [6]. В алгоритме использовался прямой метод расчета (line by line), особенности реализации которого подробно описаны в упомянутой выше работе [6].

В условиях безоблачной атмосферы и в отсутствие эффектов рассеяния расчет восходящего сол-

нечного монохроматического излучения $I \uparrow (\nu, h_{\text{sound}})$ проводится по следующей формуле:

$$I \uparrow (\nu, h_{\text{sound}}) = \frac{F_{\text{sun}}}{\pi \sec \theta_{\text{sun}}} \tau(\nu, p_0, \theta_{\text{sun}}) (1 - \epsilon) \tau(\nu, p, \theta_{\text{sound}}).$$

Здесь F_{sun} – плотность потока солнечного излучения на верхней границе атмосферы; θ_{sun} – зенитный угол Солнца; θ_{sound} – зенитный угол зондирования атмосферы (в наших расчетах 180° , надир); τ – функция пропускания атмосферы; $(1 - \epsilon)$ – отражательная способность поверхность Земли.

Предполагается, что отражательная способность земной поверхности постоянна в пределах рассматриваемого спектрального интервала, а отражение происходит по закону Ламберта. Величина $(1 - \epsilon)$ варьирует от 0.05 (лед) до 0.025 (голые почвы). Зенитные углы Солнца задаются в пределах 30° – 80° . Наблюдения проводятся с высоты $h_{\text{sound}} = 20 \text{ км}$.

Следует отметить, что указанный диапазон изменений $(1 - \epsilon)$ охватывают основные типы земных покровов, а пределы задания углов θ_{sun} являются вполне достаточными для моделирования газокорреляционных измерений в различные сезоны в средних широтах. Ограничение величины h_{sound} высотами полетов стратосферной авиации является весьма условным, так как полученные результаты с большой степенью точности применимы и для измерений из космоса.

Плотность потока солнечного излучения F_{sun} определяется соотношением

$$F_{\text{sun}}(\nu) = \pi B_{\text{sun}}(\nu) \left(\frac{a_{\text{sun}}}{d} \right)^2 s(\nu).$$

Здесь $B_{\text{sun}}(\nu)$ – функция Планка при температуре Солнца 6000°K ; a_{sun} – радиус Солнца; d – среднее расстояние от Земли до Солнца; $s(\nu)$ – пропускание солнечной хромосферы (в нашем случае полагается равным единице).

Пропускание слоя атмосферы $\tau(\beta)$, ограниченного уровнями с давлениями p и p_1 , может быть выражено следующим образом:

$$\tau(\nu, p, p_1) = \exp \left\{ - \frac{1}{g \sec \theta} \int_p^{p_1} \sum_j k_j(\nu, p') q_j(p') dp' \right\}.$$

Здесь g – ускорение свободного падения; q_j – отношение смеси j -го газа; k , как и ранее, – суммарный коэффициент поглощения различных линий и (или) континуумов, оптически активных в атмосфере газов.

В расчетах в качестве средних использовались стандартные вертикальные профили температуры, давления, концентрации метана и водяного

пара, соответствующие модели атмосферы AF-GL-86 [7] (лето средних широт) и заданные с шагом по высоте 1 км.

Соответствующие блоки программы радиационной модели использовались для расчета спектров пропускания $H_1(\nu)$ и $H_2(\nu)$ газового фильтра.

ОБЩИЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРА

Для решения задачи оптимизации параметров прибора нами использовалась приближенная методика оценки погрешности определения содержания газа в приземном слое, основанная на понятии эффективного шума и представлении измеряемого прибором сигнал Φ как суммы составляющих различного происхождения

$$\Phi = \Phi_G + \varepsilon, \quad \varepsilon = \varepsilon_G + \varepsilon_A.$$

Здесь Φ_G – основная часть сигнала, обусловленная исследуемым газом в нижней тропосфере (пограничный слой 0–4 км). Именно эта часть несет полезную информацию, в то время как сигнал ε , вызванный другими причинами, можно считать шумом с точки зрения определения содержания газа в заданном для измерений слое. Суммарный шум ε , который мы назовем эффективным, образован составляющими $\varepsilon_G = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{CH}_4}$ ($\varepsilon_{\text{CH}_4}$ – сигнал, вызванный вариациями интересующего нас газа в промежуточном слое атмосферы 4–20 км; $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$ – сигнал, обусловленный вариациями содержания в атмосфере водяного пара) и ε_A , связанный с аппаратурной погрешностью измерений, главным образом с шумом приемника излучения.

Для оценки величины составляющих эффективного шума ε_G нами были рассчитаны значения сигнала Φ , соответствующие максимальному и минимальному содержаниям соответствующих газов в атмосфере, и разность этих величин была принята равной удвоенной среднеквадратичной величине отклонения. Таким образом, дисперсии σ_i^2 соответствующих величин ε_i , где индекс i принимает значения CH_4 и H_2O вычислялись по формулам

$$\sigma_i^2 = \left(\frac{\Phi(i_{\max}) - \Phi(i_{\min})}{2} \right)^2,$$

где i_{\min} и i_{\max} соответствуют минимальному и максимальному профилю i -й составляющей атмосферы. Поскольку измеряемый сигнал представляет собой отношение двух величин $\Phi = S_D/S_A$, причем относительная погрешность знаменателя много меньше, чем числителя, относительное среднеквад-

ратичное отклонение составляющей шума ε_A можно оценить по формуле

$$\sigma_A = \frac{NER_D}{S_A}.$$

Предполагая, что все рассмотренные величины независимы как случайные, получим оценку дисперсии σ^2 эффективного шума

$$\sigma^2 = \sigma_A^2 + \sigma_G^2.$$

Таким образом, для каждого набора параметров интерференционного и газового фильтров можно рассчитать для различных условий измерений величину ε и коэффициент чувствительности прибора k , связывающий в линейном приближении изменение содержания измеряемого газа в выделенном слое атмосферы U_G с соответствующим изменением сигнала Φ . Для расчета коэффициента чувствительности k также использовалась простая оценка, связанная с изменением сигнала Φ при увеличении значений профиля содержания исследуемого газа ниже выбранной границы исследуемого слоя (4 км)

$$k = [\Phi(U_G + \Delta U_G) - \Phi(U_G)]/\Delta U_G.$$

Для любого набора параметров прибора и условий измерений, рассчитав величины k и ε , легко оценить погрешность σ_U измерения величины U_G

$$\sigma_U = \varepsilon/k.$$

Результаты таких расчетов представлены и обсуждаются в следующих разделах.

Также оценено влияние изменчивости CO и N_2O . Оказалось, что соответствующие величины изменений сигнала Φ не превосходят 0.5% суммарного эффективного шума. Поэтому в дальнейшем влияние вариаций этих газов не рассматривалось, хотя среднее поглощение ими учитывалось в расчетах.

На начальном этапе определения оптимальных параметров газового фильтра проведены расчеты погрешности определения содержания метана для различных значений толщины кюветы L_2 при глубине модуляции, равной 100% ($L_1 = 0$). Первоначально заданные из конструктивных соображений диапазоны значений параметра L_2 и давления P метана в кювете составляли 0–200 мм и 0–1 атм. Поскольку предварительные расчеты показали, что оптимальные значения лежат вне границ этих диапазонов, были приняты также большие значения L_2 и P .

При исследовании чувствительности измеряемого сигнала к изменению содержания метана в слое атмосферы 0–4 км использовалось его трехкратное увеличение, что заведомо перекрывает возможные вариации содержания метана в рассматриваемом слое [8]. При расчете погрешнос-

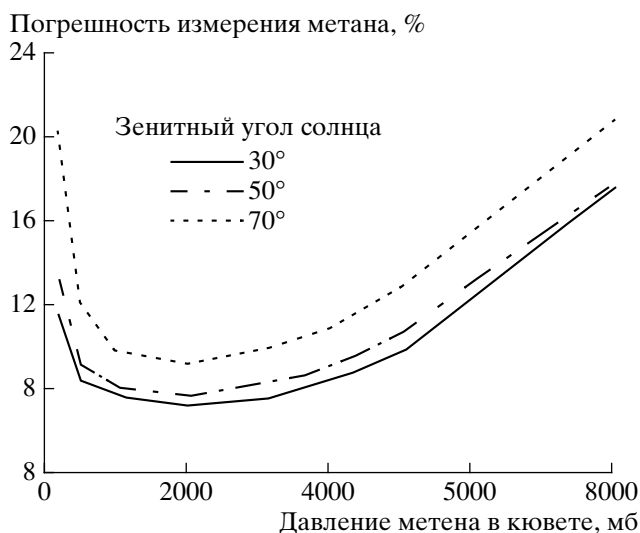


Рис. 1. Погрешность определения содержания метана в слое атмосферы 0–4 км при максимальной длине кюветы газового фильтра 20 см, глубине модуляции длины кюветы 100% и альбедо земной поверхности 0.15 в зависимости от давления метана в кювете при различных значениях зенитного угла Солнца (параметры интерференционного фильтра – $\nu_0 = 4400 \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu = 175 \text{ см}^{-1}$).

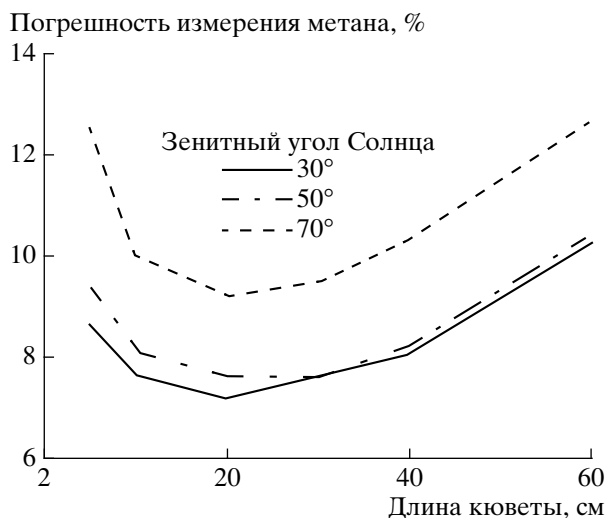


Рис. 2. Погрешность определения содержания метана в слое атмосферы 0–4 км при давлении метана в кювете газового фильтра 2000 мбар, глубине модуляции длины кюветы 100% и альбедо земной поверхности 0.15 в зависимости от максимальной длины кюветы при различных значениях зенитного угла Солнца (параметры интерференционного фильтра – $\nu_0 = 4400 \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu = 175 \text{ см}^{-1}$).

ти, вносимой за счет неопределенности профиля метана выше 4 км, использовались его вариации величиной 5% [9]. Вариации водяного пара предполагались равными 70%, что соответствует ес-

тественной изменчивости этой составляющей атмосферы [10].

Параметры широкополосного фильтра ν_0 и $\Delta\nu$ варьировали от первоначально заданных в пределах 4300–4500 см^{-1} и 100–300 см^{-1} соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показано влияние давления корреляционного газа при длине кюветы $L_2 = 20 \text{ см}$ (при глубине модуляции 100%) на погрешность восстановления содержания метана в слое атмосферы 0–4 км для различных зенитных углов Солнца. Из рисунка видно, что наименьшие погрешности (7%) достигаются для давления метана в кювете, равного 2 атм.

Отклонение давления от оптимальной величины, как в большую, так и в меньшую стороны, приводят к возрастанию погрешности. Такой результат согласуется с приведенными выше соображениями. Он обусловлен тем, что, с одной стороны, при уменьшении давления газа в кювете уменьшается разностный сигнал S_D , несущий полезную информацию, вследствие чего растет погрешность определения содержания метана, а с другой стороны – при увеличении давления газа в кювете возрастает эффективный шум, вызванный изменчивостью водяного пара (и, вообще говоря, других газов) в атмосфере, что также приводит к росту погрешности определения содержания метана.

Результаты аналогичных расчетов, но теперь уже для зависимости погрешности от длины кюветы при фиксированном давлении 2 атм, представлены на рис. 2. Наименьшие погрешности восстановления метана при этом для различных зенитных углов Солнца составляют примерно 7% (для газовой кюветы длиной 20 см) и наблюдаются при том же сочетании длины кюветы и давления газа. Отклонение длины кюветы от оптимальной величины 20 см как в большую, так и в меньшую сторону, приводит к возрастанию погрешности. Такой результат также находится в согласии с предположениями, изложенными выше.

Представляет интерес исследование влияния уменьшения глубины модуляции оптической толщины корреляционного газа. Из изложенных выше общих соображений можно ожидать, что такое уменьшение позволит снизить влияние метана, расположенного выше уровня 4 км. Для рассматриваемых параметров прибора и, прежде всего, чувствительности приемника излучения, а также для принятой для расчетов величины естественных вариаций метана наши расчеты ожидаемый эффект не подтвердили. Минимальные значения погрешности определения метана в слое 0–4 км (7–9%) соответствуют максимальной (100%) глубине модуляции. Несмотря на то, что, как по-

казал анализ, эффективный шум, вызванный промежуточным (4–20 км), слоем метана, существенно падает при уменьшении глубины модуляции, величина полезного сигнала исследуемого слоя 0–4 км уменьшается более значительно, что и приводит к наблюдаемому эффекту.

На рис. 3 показаны результаты оценок влияния параметров интерференционного фильтра на погрешность определения содержания метана в зависимости от высоты верхней границы слоя, заданного для измерения. Из рисунка хорошо видно, что при использовании широкого фильтра ($\nu_0 = 3450 \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu = 300 \text{ см}^{-1}$) погрешности восстановления метана в слоях существенно возрастают. Это вызвано возрастанием компоненты эффективного шума, обусловленной изменчивостью содержания водяного пара в атмосфере, вследствие наложения его полосы поглощения на полосу метана. Использование фильтра из работы [5] существенно уменьшает ошибку измерений. Применение интерференционного фильтра с уточненными для оптимальных параметров кюветы характеристиками (более широкий, чем в [5] фильтр со сдвинутым в сторону меньших волновых чисел центром) позволяет уменьшить погрешность восстановления метана, например, для слоя 0–4 км на величину, превышающую 1%. Необходимо отметить, что уточненные характеристики интерференционного фильтра использовались при расчетах, результаты которых приведены на рис. 1–3.

Итак, наши расчеты показали, что оптимальные значения параметров газового и интерференционного фильтров, которые целесообразно использовать для итоговых оценок погрешностей определения содержания метана в слое 0–4 км, должны выглядеть следующим образом: параметры интерференционного фильтра – $\nu_0 = 4400 \text{ см}^{-1}$, $\Delta\nu = 175 \text{ см}^{-1}$; длина кюветы газового фильтра – 20 см; парциальное давление метана в кювете – 2000 мбар; глубина модуляции – 100%.

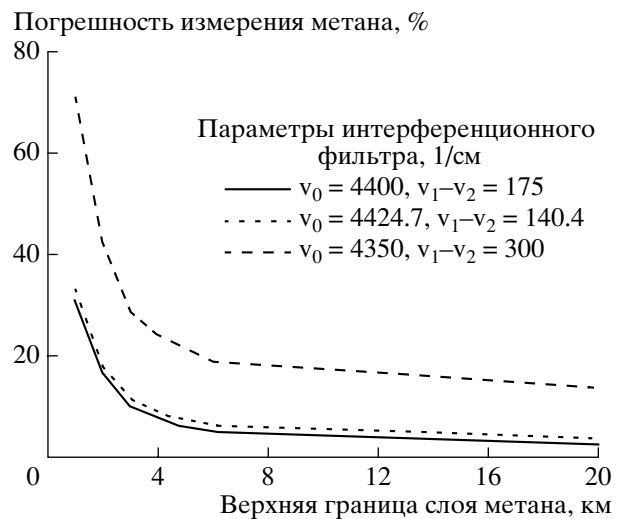


Рис. 3. Погрешность определения содержания метана в слое атмосферы различной толщины при оптимальных параметрах газового фильтра и разных значениях параметров интерференционного фильтра (альbedo земной поверхности 0.15, зенитный угол Солнца 50°).

Для этих оптимальных значений были рассчитаны зависимости ошибок определения содержания метана в приземном слое 0–4 км для различных типов земной поверхности и зенитных углов Солнца. Результаты этих расчетов представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Из таблицы видно, что существенное возрастание погрешностей наблюдается в случае малых альbedo поверхности (0.05) и в случае больших зенитных углов Солнца. Это возрастание объясняется уменьшением оптического сигнала, вызванным в первом случае уменьшением доли отраженного солнечного излучения и уменьшением освещенности подстилающей поверхности во втором случае.

В табл. 1 аппаратная составляющая σ_A выделена из суммарной ошибки σ . В отдельном столб-

Таблица 1. Суммарная (σ) ошибка и ее составляющие (σ_A, σ_G) определения содержания метана (в %) в слое 0–4 км при различных значениях отражательной способности поверхности и зенитного угла Солнца для оптимизированных параметров фильтров и пороговой энергетической чувствительности прибора $NER_D = 6 \times 10^{-2} \text{ мВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$

Альbedo, тип покрова	0.05 лед		0.10 мох. лишайник		0.15 лес		0.20 лесостепь		0.25 голые почвы		0.05–0.025
	σ	σ_A	σ	σ_A	σ	σ_A	σ	σ_A	σ	σ_A	
Зенитный угол Солнца, град											σ_G
30	12.7	11.1	8.3	5.5	7.2	3.7	6.7	2.8	6.5	2.2	6.2
40	13.5	12.1	8.6	6.0	7.3	4.0	6.8	3.0	6.6	2.4	6.1
50	14.9	13.6	9.1	6.8	7.6	4.5	7.0	3.4	6.6	2.7	6.1
60	17.3	16.2	10.1	8.1	8.1	5.4	7.2	4.0	6.8	3.2	6.0
70	22.0	21.2	12.1	10.6	9.2	7.1	7.9	5.3	7.2	4.2	5.9
80	35.7	35.3	18.5	17.6	13.1	11.8	10.5	8.8	9.1	7.0	5.7

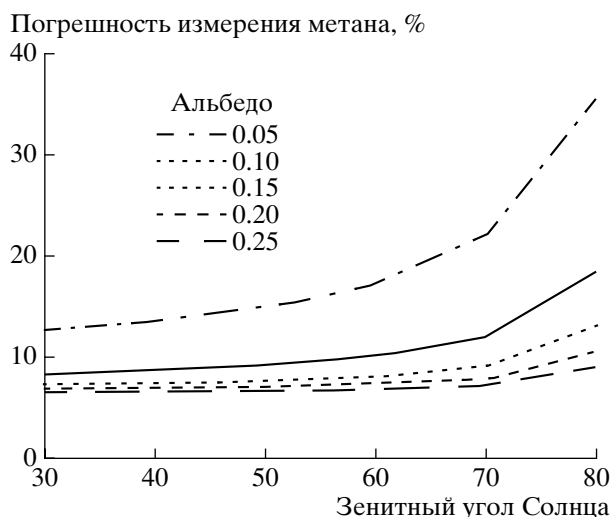


Рис. 4. Погрешность определения содержания метана в слое атмосферы 0–4 км в зависимости от зенитного угла Солнца при оптимальных параметрах газового и интерференционного фильтров и различных значений альбедо подстилающей поверхности.

це представлена атмосферная составляющая σ_G , зависящая только от зенитного угла Солнца. Такое разделение является целесообразным в связи с различными возможностями понизить указанные компоненты шума в зависимости от условий и характера эксперимента. Аппаратурные шумы σ_A могут быть понижены за счет увеличения времени одного измерения или применения более чувствительного приемника излучения. Например, при замене рассматриваемого приемника PbSe на более инерционный (PbS) величина σ_A может быть уменьшена в три раза. Использование такого детектора и увеличение времени измерения вполне допустимы при сравнительно однородных условиях наблюдений, например, зимой надо льдом или снегом. Ошибка σ_G , связанная с влиянием атмосферных факторов, может быть уменьшена за счет привлечения данных наземного и аэрологического зондирования атмосферы в районах проведения экспериментов и соответствующей обработки результатов измерений.

Отметим, что даже без использования указанных возможностей суммарные ошибки измере-

ния содержания метана в большинстве случаев (при зенитных углах Солнца 30° – 70° и диапазона изменения отражательной способности поверхности 0.1–0.25) удовлетворяют современным требованиям Всемирной метеорологической организации. Эти требования для метана допускают величины случайной и систематической ошибок измерений 10 и 20% соответственно при высоте верхней границы исследуемого слоя 4 км [11].

СРАВНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ПРИБОРАМИ С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Для сравнения возможностей газокорреляционных ИК-радиометров с различными значениями параметров фильтров были проведены расчеты коэффициента k зависимости величины полезного сигнала от содержания метана в атмосфере, а также ошибки определения содержания метана по измерениям отраженного солнечного излучения.

Расчеты проведены для следующих трех типов радиометров:

1) прибор с глубоководохлаждаемым приемником излучения из InSb, $NER_D = 6 \times 10^{-3}$ мВт м⁻² ср⁻¹, газовым фильтром [4] и интерференционным фильтром [5] (прибор 1 – аппаратура МОПИТТ ИСЗ EOS [2]);

2) прибор с оптимальными параметрами фильтров и приемником из PbSe или InAs с термоэлектрическим охлаждением, $NER_D = 6 \times 10^{-2}$ мВт м⁻² ср⁻¹ (прибор 2);

3) гипотетический прибор с параметрами фильтров прибора МОПИТТ и приемником с термоэлектрическим охлаждением, $NER_D = 6 \times 10^{-2}$ мВт м⁻² ср⁻¹ (прибор 3).

В табл. 2 описаны основные характеристики рассматриваемых приборов. В табл. 3 представлены результаты расчетов: коэффициент k и суммарная погрешность определения содержания метана в слое 0–4 км и во всей толще атмосферы до уровня 20 км при различных зенитных углах Солнца. Последние два столбца табл. 3 относятся к случаю положения Солнца в зените для сравнения полученных результатов с модельными рас-

Таблица 2. Характеристики сравниваемых приборов: L_2 – длина кюветы газового фильтра; P – давление; $\Delta\nu$ – ширина и ν_0 – центр полосы пропускания интерференционного фильтра; NER_D – пороговая энергетическая чувствительность прибора

Прибор	L_2 , см	Глубина модуляции, %	P , мбар	ν_0 , см ⁻¹	$\Delta\nu$, см ⁻¹	NER_D , мВт/м ² ср
1	2	66	800	4424.7	140.4	6×10^{-3}
2	20	100	2000	4400.0	175.0	6×10^{-2}
3	2	66	800	4424.7	140.4	6×10^{-2}

Таблица 3. Суммарная ошибка (σ) определения содержания метана и коэффициент (k) зависимости величины полезного сигнала (Φ) от содержания метана (U) в слоях атмосферы 0–4 км и 0–20 км для приборов с различными параметрами газового фильтра при разном зенитном угле Солнца (θ)

Прибор	$\theta = 50^\circ, 0-4 \text{ км}$		$\theta = 50^\circ, 0-20 \text{ км}$		$\theta = 0^\circ, 0-20 \text{ км}$	
	$k = \Delta\Phi/\Delta U$	$\sigma, \%$	$k = \Delta\Phi/\Delta U$	$\sigma, \%$	$k = \Delta\Phi/\Delta U$	$\sigma, \%$
1	0.007	6.8	0.006	1.9	0.006	1.3
2	0.047	8.6	0.039	3.2	0.034	2.4
3	0.007	37.0	0.006	18.5	0.006	12.8

четами [2] для аппаратуры МОРИТТ, проведенными для этих условий измерений.

Как видно из табл. 3, несмотря на существенно меньшую чувствительность приемника, прибор 2, рассматриваемый в настоящей статье, позволяет получить близкие к прибору 1 (МОРИТТ) значения погрешности. Этот эффект достигается в первую очередь за счет оптимизации параметров газового фильтра, что ведет к существенному возрастанию коэффициента k . Последняя строка табл. 3 (прибор 3) также наглядно показывает необходимость проведенной в настоящей работе оптимизации: использование в рассматриваемом приборе фильтров, аналогичных аппаратуре МОРИТТ, привело бы к недопустимо большому величинам погрешностям измерения метана, приблизительно в пять раз большим, чем полученные при использовании оптимальных фильтров.

Для сопоставления наших результатов с результатами [2] были выполнены также оценки погрешности по методике указанной работы: рассматривались только собственные шумы прибора при альбедо 0.1 и зенитном угле Солнца 0° , а погрешности восстановления метана определялись как отношения шума прибора к изменению разностного сигнала S_D при 1% вариации содержания метана. При этом были получены следующие значения: для прибора МОРИТТ – 0.68%, для рассматриваемого прибора с оптимальным газовым фильтром – 0.95%, для этого же прибора с фильтрами МОРИТТ – 6.8%. Первая из приведенных величин удовлетворительно согласуется с полученной в упомянутой работе величиной погрешности 0.6%, что позволяет сделать вывод о согласованности результатов обеих работ. Отношение последних двух величин свидетельствует о преимуществе оптимального газового фильтра рассматриваемого нами прибора.

ВЫВОДЫ

1. Получены оптимальные характеристики газового и интерференционного фильтров газокорреляционного ИК-радиометра, обеспечивающие максимальную точность определения содержания метана в приземных слоях атмосферы по измерениям

с высоты 20 км отраженного земной поверхностью солнечного излучения.

2. Показано, что прибор с оптимальными параметрами газового и интерференционного фильтров при одинаковых условиях измерений позволяет получить в пять раз меньшие ошибки определения содержания метана, чем параметры фильтров в газокорреляционном ИК-радиометре МОРИТТ американского спутника EOS в предположении, что энергетическая чувствительность обоих приборов $NER_D = 6 \times 10^{-2} \text{ мВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$.

3. Показано, что потенциальная точность измерений содержания метана в слое 0–4 км при оптимальных параметрах фильтров составляет 5–10% от фонового содержания в свободной атмосфере лета средних широт при зенитных углах Солнца $30^\circ-70^\circ$ и разнообразных типах земных покровов. Указанная точность может быть реализована при времени единичного измерения 0.5 с, относительно малом весе и энергопотреблении прибора. Последнее определяется тем, что за счет высокого коэффициента пропускания газового фильтра достаточной для радиометра является $NER_D = 6 \times 10^{-2} \text{ мВт м}^{-2} \text{ ср}^{-1}$. Такую чувствительность можно обеспечить при использовании обычных приемников ИК-излучения с термоэлектрическим охлаждением до 210–230 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 01-05-65392).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Talor F.W.* Pressure modulator // *Spectrosc. Techniques*. 1983. V. 3. P. 137–197.
2. *Pan L., Edwards D.P., Gille J.C. et al.* Satellite remote sensing of tropospheric CO and CH₄: forward model studies of the МОРИТТ instrument // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. № 30. P. 6976–6988.
3. *Drummond J.R.* Novel correlation radiometer: the length-modulation radiometer // *Appl. Opt.* 1989. V. 28. № 13. P. 2451–2452.
4. *Tolton B.T., Drummond R.D.* Characterization of the length-modulation radiometer // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 22. P. 5409–5419.
5. *Smith M.W.* Method and results for optimizing the methane bandpass // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 18. P. 4285–4291.

6. Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Алгоритм прямого расчета функций пропускания в задачах наземного дистанционного зондирования атмосферы // Вест. С.-Петерб. университета. Сер. 4. 1999. Вып. 1. № 4. С. 25–31.
7. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X. et al. AFGL atmospheric constituent profiles (0–120 km) // AFGL-TR-86-0110. Environ. Res. Papers. 1986. № 954. 43 p.
8. Макарова М.В., Поберовский А.В., Тимофеев Ю.М. Спектроскопические измерения общего содержания метана в районе Санкт-Петербурга // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 1. С. 67–73.
9. Nakazawa T. et al. Measurement of the concentration of CO₂, CH₄ and CO and the carbon and oxygen isotope ratio in the troposphere over Russia // J. geophys. Res. 1997. V. 102. № D3. P. 3843–3859.
10. Steinhagen H., Bakan S., Boesenberg J. et al. Field campaign LINEX 96/1 – Possibilities of water vapor observation in the free atmosphere // Meteorol. Z. 1998. Dezember. N. F. 7. S. 377–391.
11. WMO/CEOS Report on a strategy for integrated satellite and ground-based observation of ozone. World Meteorological organization // Global atmospheric watch. WMO TD № 1046. 2001. № 140. 128 p.

OPTIMIZATION OF GAS CORRELATION IR-RADIOMETER PARAMETERS FOR METHANE TOTAL COLUMN AMOUNT MEASUREMENTS IN A BOUNDARY LAYER OF ATMOSPHERE FROM AIR AND SPACE PLATFORMS

Ya. A. Virolainen, B. V. Dementiev, V. V. Ivanov, A. V. Polyakov

Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow; St. Petersburg State University, Russia

The optimization algorithm of the gas correlation IR-radiometer selective elements parameters is proposed. It is applied to measurement of pollution in the near surface layers of atmosphere by observation of the Earth's surface reflected solar radiation, which passed through the atmosphere. Peculiarity of the algorithm is the taking into account the instrumental noise, the "noise" of irrelevant gases variations at full atmosphere and the target gas variation above the layer under investigation, as summarized effective noise. It is shown potential accuracy of the total methane nadir measurements in the layer 0–4 km by the instrument with optimized parameters of the gas and interference filters is of 5–10% of background value in the layer. The accuracy takes place for the summer middle latitude atmospheric model when the Sun zenith angle is of 30°–70° and the Earth's surface albedo is of 0.1–0.25. It may be realized while the time per one measurement is of 0.5 s and the using of ordinary photo detector with thermoelectric cooler.