
**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

УДК 528.813

**УЧЕТ РАССЕЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ
В НАЗЕМНЫХ ГАЗО-КОРРЕЛЯЦИОННЫХ
ИЗМЕРЕНИЯХ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА**

© 2004 г. Я. А. Виролайнен*, А. В. Поляков

*Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета,
Санкт-Петербург*

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

Поступила в редакцию 16.01.2004 г.

Предложены физико-математическая модель, алгоритмы и программы для расчета сигналов, регистрируемых газо-корреляционным прибором в полосе поглощения метана 2.2 мкм, для наземной и самолетной геометрии измерений, дополненные учетом рассеяния на аэрозольных частицах в безоблачной атмосфере. Продемонстрировано хорошее с учетом различия исходных моделей соответствие результатов расчетов потоков прямого и рассеянного нисходящего солнечного излучения, поступающих на вход прибора из верхней полусферы, рассчитанных по оригинальной разработанной программе и по программе MODTRAN.

ВВЕДЕНИЕ

Современной тенденцией развития исследований, связанных с влиянием естественных и антропогенных факторов на параметры газового состава атмосферы, является разработка дистанционных методов мониторинга последнего, обеспечивающих получение карт распределения примесей с высоким пространственным и временным разрешением. Эта проблема весьма актуальна как для больших городов, где имеет место скопление транспорта и экологически опасных производств, так и для обширных регионов с малой плотностью населения, где отсутствуют средства мониторинга опасных ситуаций природного и техногенного характера. При решении этой проблемы наибольший интерес представляют методы дистанционного зондирования (ДЗ) пограничного слоя атмосферы в целях контроля наземных источников загрязнения и предупреждения техногенных аварий и природных катастроф. Проводящиеся в настоящее время наземные измерения не дают полной картины распределения примесей и их источников над обширными территориями, а разработанные у нас в стране спутниковые и самолетные приборы широкого обзора либо не обладают достаточной чувствительностью к содержанию газов в приземном слое атмосферы, либо имеют большие габариты, вес и энергопотребление. Метод газо-селективной (или газо-корреляционной) 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 приземном слое. Одним из приборов, используе-

мых для мониторинга газового состава атмосферы, является спутниковый ИК-радиометр МОРИТТ, предназначенный для определения содержания CO и CH₄ в нижней тропосфере [1]. В работе [2] нами были рассмотрены возможности определения содержания метана в приземном слое атмосферы близким методом, основанным на самолетных измерениях с больших высот отраженного от Земли солнечного излучения с помощью нового компактного газо-корреляционного радиометра (ГКР). В настоящей работе продолжается анализ информативности измерений излучения рассмотренным прибором в применении к наземной геометрии измерений.

В работе [1] рассмотрена физико-математическая модель измерения отраженного от поверхности Земли солнечного излучения с помощью спутникового прибора МОРИТТ в полосе метана 2.2 мкм, не включающая в себя учет рассеяния солнечного излучения. Следует отметить, что ранее вопрос рассеяния в газо-корреляционном методе не рассматривался, и корректные оценки малости вклада рассеянного излучения нам в литературе не встречались.

В работе [2] нами получены первые оценки точности определения содержания метана в нижнем слое атмосферы (0–4 км) по самолетным измерениям с высоты 20 км отраженного солнечного излучения прибором ГКР, который может быть использован как на Земле, так и на авианосителях. При этом так же, как и при анализе эксперимента с прибором МОРИТТ, использовалась приближенная физико-математическая модель газо-корреляционных измерений, в которой учитывался только один компонент – отражение сол-

нечного излучения от поверхности, т.е. расчет сигналов осуществлялся только на уровне функций пропускания всей толщи атмосферы. В реальности сигнал формируется также за счет других компонентов, обусловленных рассеянием солнечного излучения на аэрозолях.

В настоящей работе физико-математическая модель и алгоритм расчета переноса излучения в атмосфере [3] для измерения в полосе метана 2.2 мкм дополнены учетом рассеяния солнечного излучения на атмосферном аэрозоле. Таким образом, впервые анализируется точность определения содержания малых газовых составляющих (МГС) в атмосфере газо-корреляционным методом на основе более корректной модели формирования измеряемых сигналов ГКР. Следует также отметить, что рассмотренный алгоритм позволяет учесть многолучевое распространение пучка в газовой кювете и допускает его применение для различных возможных (наземных и авиационных) геометрий наблюдения.

Кроме того, в предлагаемой работе на основе оптимизированных для самолетных измерений параметров газового и интерференционного фильтров [2] получены оценки потенциальных погрешностей восстановления метана по наземным измерениям нисходящего солнечного излучения и проанализировано влияние учета рассеяния аэрозольными частицами на эти оценки.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Алгоритм расчета регистрируемого прибором сигнала по причине прохождения излучения через кювету с исследуемым газом – основной особенностью прибора, должен корректно учитывать спектральный ход как приходящего на вход прибора излучения, так и поглощения в кювете. Поэтому в основу методики расчета положен метод прямого (line by line) интегрирования по волновому числу. Поскольку основная задача, для которой создается описываемый алгоритм – оценка содержания газов в определенных слоях атмосферы, необходимо обеспечить высокую точность расчетов при интегрировании по толще атмосферы. Поэтому интегрирование по трассе распространения излучения в атмосфере также выполняется численно, что в принципе позволяет учесть любые особенности профилей вертикального распределения исследуемого и мешающих газов. Требования к точности расчетов ведут к необходимости использования контура Фойгта спектральных линий. В программе также предусмотрен учет поглощения в континууме водяного пара. Подобные алгоритмы, реализующие непосредственное интегрирование по спектру и толще атмосферы и суммирующие непосредственно вклад спектральных линий в широких спектральных

областях, неизбежно требуют существенных вычислительных ресурсов. Для снижения вычислительных затрат и ускорения вычислений используется ряд приемов, которые ранее нами описаны в [3].

Помимо поглощения газами, в рассматриваемой спектральной области наблюдается рассеяние солнечного излучения на частицах атмосферного аэрозоля. В первую очередь при рассматриваемых геометриях измерений заметно влияние тропосферного аэрозоля. Поэтому алгоритм позволяет учесть на этапе расчета монохроматического излучения вклад рассеянного на тропосферном аэрозоле излучения.

Уравнение переноса солнечного излучения с учетом рассеяния может быть записано следующим образом:

$$\frac{dI(v, z, \vartheta, \varphi)}{dz} \cos \vartheta = -\alpha(v, z)I(v, z, \vartheta, \varphi) + \frac{\sigma(v, z)}{4\pi} \int_0^\pi \sin \vartheta' d\vartheta' \int_0^{2\pi} d\varphi' x(v, z, \gamma) I(v, z, \vartheta', \varphi'). \quad (1)$$

Здесь I – интенсивность излучения; α – коэффициент ослабления; σ – коэффициент рассеяния; x – индикатриса рассеяния; v – волновое число; z – высота; ϑ – зенитный угол; φ – азимут. Переходя к оптическим толщам $\tau = \int_z \alpha(z) dz$ и косинусу зенитного угла $\eta = \cos \vartheta$ в приближении однократного рассеяния [4], интенсивность рассеянного излучения можно выразить с помощью (2)

$$I(\tau, \eta, \eta_0, \varphi) = \left(\frac{S}{4\eta} \int_0^\tau \Lambda(\tau') x(\tau', \omega_0) \exp\left(-\frac{\tau'}{\eta_0} - \frac{\tau - \tau'}{\eta}\right) d\tau' \right) \quad (2)$$

Здесь $\Lambda(\tau) = \frac{\sigma_{\text{aer}}}{(\alpha_{\text{aer}}(\tau) + k_{\text{mol}}(\tau))}$ – альbedo однократного рассеяния (индексы aer и mol относятся к аэрозольной и молекулярной компоненте соответственно); $\omega_0 = \eta\eta_0 + \sqrt{(1-\eta)^2(1-\eta_0)^2} \cos \varphi$ – косинус угла рассеяния. Монохроматический поток полного излучения из верхней полусферы в этом случае рассчитывается по формуле (3)

$$F_v^\downarrow(\eta_0, \tau_0) = \frac{S_v}{4} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^1 d\eta \int_0^{\tau_0} \Lambda(\tau) x(\tau, \omega_0) \times \exp\left(-\frac{\tau}{\eta_0} - \frac{\tau_0 - \tau}{\eta}\right) d\tau + \pi S_v \eta_0 \exp\left(-\frac{\tau_0}{\eta_0}\right). \quad (3)$$

Здесь и в формуле (2) $S_v = B_v(6000^\circ) \left(\frac{a_{\text{sun}}}{d}\right)^2$ – интенсивность солнечного излучения на верхней

границе атмосферы [2], где a_{sun} – средний радиус Солнца; d – среднее расстояние от земли до Солнца. Заметим, что в нашей задаче мы ограничиваемся учетом влияния однократно рассеянного солнечного излучения. Предварительный анализ рассчитанных значений нисходящего из верхней полусферы потока солнечного излучения в полосе 2.2 мкм по широко известной программе MODTRAN [5] показал, что в данных условиях вклад более высоких порядков рассеяния пренебрежимо мал.

Поскольку интегрирование в формуле (3) проводится по оптическим толщам $\tau(z)$, предварительно рассчитываются оптические толщи. Учитывая при этом селективное и континуальное поглощение молекул, а также ослабление аэрозолем и используя простейшие преобразования, для оптической толщи атмосферы получаем выражение

$$\begin{aligned} \tau(z) &= \int_z^{z_0} (\alpha_{\text{aer}}(z') + k_{\text{mol}}(z')) dz' = \\ &= H\alpha_{\text{aer}}(0) \left(\exp\left(-\frac{z}{H}\right) - \exp\left(-\frac{Z_{\text{aer}}}{H}\right) \right) + \int_z^{z_0} k_{\text{mol}}(z') dz', \end{aligned} \quad (4)$$

где H – высота однородной атмосферы; Z_{aer} – высота аэрозольного слоя. Таким образом, для учета ослабления аэрозолем по высоте нам достаточно иметь информации об ослаблении на нижней границе атмосферы, поскольку мы предполагаем экспоненциальную зависимость оптических свойств аэрозоля от высоты [6].

Алгоритм, моделирующий измеряемый ГКР-сигнал, составлен следующим образом:

- 1) для задаваемой аэрозольной модели по формуле (4) рассчитываются монохроматические оптические толщи атмосферы;
- 2) по формуле (3) рассчитываются монохроматические величины потока из верхней полусферы, приходящего на вход газо-корреляционного прибора;
- 3) полученные значения потоков сворачиваются с аппаратной функцией прибора с учетом пропускания газовых кювет и рассчитываются разностный и средний сигналы, а также их отношение Φ – измеряемый прибором сигнал (подробное описание этого этапа дано в работе [2]).

КОНТРОЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Как уже упоминалось ранее, для предварительной оценки влияния эффектов рассеяния на приходящее излучение мы использовали программу MODTRAN [5], задав состояние атмосферы для середины лета средних широт на высотах от 0 до 80 км при наземной геометрии наблюдений. Поскольку программа MODTRAN выполняет расчеты со спектральным разрешением не ме-

нее 2 см⁻¹, она не может быть использована для моделирования и интерпретации измерений сигналов ГКР. Тем не менее, мы использовали ее для расчета потоков излучения в широких спектральных интервалах. Рассчитывалась суммарная радиация в интервале волновых чисел 4260–4460 см⁻¹, включающем полосу метана. Интегрирование излучения по волновому числу проводилось в интервалах по 50 см⁻¹ с треугольной аппаратной функцией. Зенитный угол Солнца во всех расчетах составлял 50°. При этом рассчитывались потоки F рассеянного однократно солнечного излучения, которые интегрировались по телесному углу в соответствии с формулой (5)

$$F = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I(\theta, \varphi) \sin\theta \cos\theta d\theta. \quad (5)$$

Здесь φ – относительный азимут – угол между азимутом Солнца и азимутом места наблюдения; θ – зенитный угол наблюдения; $I(\theta, \varphi)$ – интенсивность рассеянного солнечного излучения. Помимо рассеянного потока излучения рассчитывался также поток прямого солнечного излучения в отсутствие рассеяния. Кроме вертикальных профилей газовых составляющих атмосферы задавалось аэрозольное состояние атмосферы с соответствующими коэффициентами рассеяния и ослабления, а также индикатрисой рассеяния. Следует отметить, что, как и в нашем алгоритме, рассматривался случай безоблачной атмосферы.

На рис. 1 показана зависимость рассчитанного рассеянного излучения от зенитного угла наблюдения для случая достаточно замутненной атмосферы с дальностью видимости 5 км. При учете заданного зенитного угла Солнца (50°), из рисунка хорошо видно, что основной вклад в поток рассеянного излучения приходится на зенитные углы наблюдения, достаточно близкие к зенитному углу Солнца (45°–60°). Следует отметить, что для азимутальных углов наблюдения основной вклад в поток соответствует азимутам, близким к азимуту Солнца (относительный азимут – менее 15°–20°. Таким образом, для сильно замутненной атмосферы, когда доля рассеянного излучения в полном потоке достаточно велика (14.2%), траектория основной части рассеянного излучения близки к траекториям прямого солнечного излучения. На рис. 1 также представлены два дополнительных случая зависимости интенсивности рассеянного излучения для относительного азимута, равного 0 (максимум вклада рассеяния), и для менее загрязненной атмосферы (модель аэрозоля с дальностью видимости 23 км и модель тропосферного аэрозоля с дальностью видимости 50 км). Видно, что для случая чистой атмосферы (VIS = 50 км) не наблюдается максимума рассеянного излучения вблизи зенитных углов, близких к зенитному углу

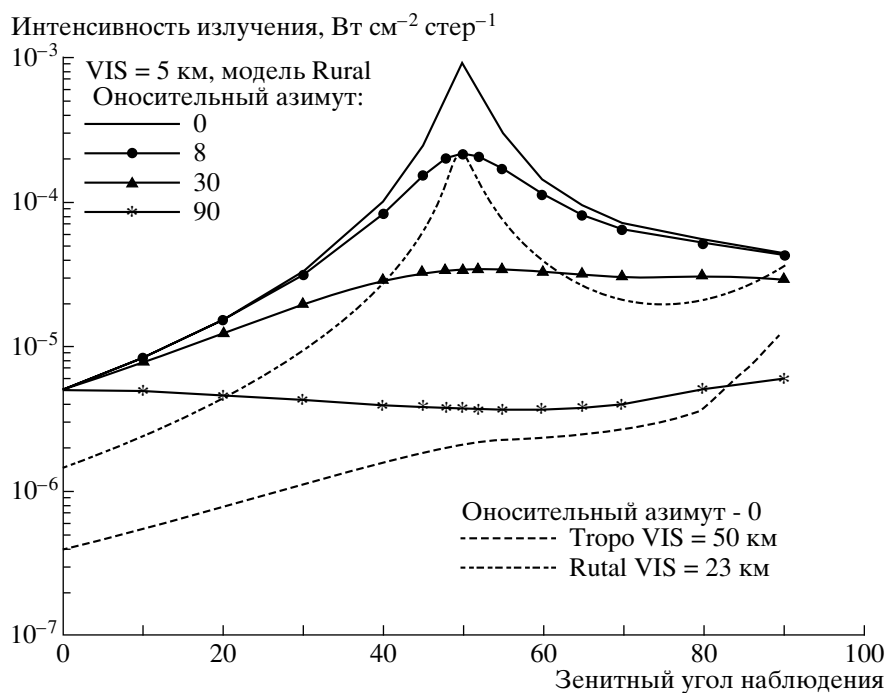


Рис. 1. Интенсивность прошедшего через атмосферу однократно рассеянного солнечного излучения в зависимости от зенитного угла наблюдения (зенитный угол Солнца – 50°).

Солнца: вклад рассеяния несколько возрастает при росте угла наблюдения. Доля потока рассеянного излучения при этом составляет 0.5% от полного потока, поэтому форма этой кривой на рис. 1 не существенна. Для модели аэрозоля с VIS = 23 км, максимум есть, но он менее выражен (доля рассеянного – 3.9%). В целом можно отметить, что в присутствии рассеянного на аэрозолях потока излучения, когда его вклад в полный поток сколько-либо значим, основная его доля приходится на достаточно узкий телесный угол наблюдения, включающий направление на Солнце, что позволяет значительно упростить расчеты.

После завершения разработки алгоритма, удовлетворяющего описанным в предыдущем параграфе требованиям, нами была выполнена серия расчетов для сопоставления результатов нового алгоритма с результатами расчетов программой MODTRAN. Основной целью сопоставлений являлась проверка учета рассеянного солнечного излучения. Для различных зенитных углов Солнца и наземной геометрии измерений были рассчитаны потоки прямого и рассеянного солнечного излучения, попадающего на вход газокорреляционного радиометра, в полосе поглощения метана 2.2 мкм. Расчеты проводились по программе MODTRAN, а также по разработанной нами программе. Высотные профили атмосферных газов для обеих программ использовались одинаковые (лето средних широт из модели AFGI-86 [7]), аэрозольные – различные. Сложность проведения сопоставлений

вызывается тем, что аэрозольные модели программы MODTRAN и используемой нами модели ОПАС [6] основаны на различных исходных данных и принципах, что привело к невозможности использования в расчетах одной и той же аэрозольной модели. Мы учитывали влияние аэрозоля только в пограничном слое атмосферы 0–2 км, т.е. предполагалось, что в лежащих выше слоях аэрозоль отсутствует. Более подробно использование модели ОПАС для составления оптических статистических моделей тропосферного аэрозоля рассмотрено нами в работе [8]. Следует также отметить, что в отличие от нашей задачи в программе MODTRAN, кроме ослабления излучения аэрозолем в пограничном слое, учитывается также ослабление аэрозолем в свободной тропосфере и стратосферным аэрозолем.

Результаты расчетов приведены в табл. 1 (предложенный в настоящей работе алгоритм) и 2 (MODTRAN). В оригинальном алгоритме мы рассмотрели 10 моделей (расшифровка в столбце 2 табл. 1), соответствующих континентальному аэрозолю при различных значениях дальности видимости (VIS = 5, 23 и 50 км). Эти модели подбирались, исходя из особенностей соответствующих моделей в блоках программы MODTRAN (см. столбец 1 табл. 2). Urban – городской аэрозоль; Rural – сельский; Tropospheric – модель, учитывающая только тропосферный аэрозоль). Некоторое представление о различии аэрозольных моделей MODTRAN и ОПАС дает табл. 3, в которой

Таблица 1. Потоки прямого и рассеянного солнечного излучения ($Вт/м^2$) для различных аэрозольных состояний атмосферы из модели OPAC, рассчитанные с использованием разработанной программы

№	Модель аэрозоля	VIS, км	Прямое солнечное	Рассеянное солнечное	Рассеянное/Полное, %	$\sigma_{aer}/\alpha_{aer}$, %
1	Городской	5	3.21	0.23	6.61	40
2	Чистый континентальный	50	3.98	0.04	0.94	86
3	Чистый континентальный	23	3.89	0.08	2.01	86
4	Чистый континентальный	5	3.31	0.31	8.48	86
5	Средний континентальный	50	3.98	0.04	0.88	60
6	Средний континентальный	23	3.88	0.07	1.88	60
7	Средний континентальный	5	3.29	0.28	7.93	60
8	Загрязненный континентальный	50	3.99	0.03	0.69	55
9	Загрязненный континентальный	23	3.90	0.06	1.48	55
10	Загрязненный континентальный	5	3.35	0.23	6.38	55

Таблица 2. Потоки прямого и рассеянного солнечного излучения ($Вт/м^2$) для различных аэрозольных состояний атмосферы, рассчитанные с использованием программы MODTRAN

Модель аэрозоля	VIS, км	Прямое солнечное	Рассеянное солнечное	Рассеянное/полное, %	$\sigma_{aer}/\alpha_{aer}$, %
Urban	5	2.83	0.37	11.6	40
Rural	5	3.09	0.51	14.2	75
Rural	23	3.69	0.15	3.91	–
Tropospheric	50	3.86	0.02	0.51	50

в столбцах 3–5 приведены относительные массовые составы различных аэрозольных моделей.

В столбцах 5 табл. 1 и 4 табл. 2 показано отношение потока рассеянного излучения к полному потоку, попадающему на прибор, в столбцах 6 и соответственно 5 таблиц – отношение коэффициента аэрозольного рассеяния к коэффициенту аэрозольного ослабления для рассматриваемых моделей, дающее некоторое представление о составе рассматриваемого аэрозоля.

Сравнивая табл. 1 и 2, можно видеть, что величины как ослабленного прямого, так и вклада рассеянного излучения, рассчитанного по разным программам, несколько отличаются. Так, например, для программы MODTRAN (табл. 2) характерны более значительные вариации как ослабленного, так и рассеянного излучения – в зависимости от аэрозольной модели. Максимальный вклад рассеянного в полное излучение составляет 14.2% для модели Rural с дальностью видимости 5 км. Для расчетов по нашей программе максимум доли рассеянного излучения (8.5%) приходится на модель чистого континентального аэрозоля с дальностью видимости 5 км. При этом отношение коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления (столбец 4 табл. 1 и 2) в наших расчетах составляет 86%, в расчетах программы MODT-

RAN – 75%. Эти цифры свидетельствуют о различии в составе аэрозольных моделей, что также хорошо видно из табл. 3 – в составе модели MODTRAN Rural входит 70% водорастворимых частиц (WASO) и 30% не растворимых в воде частиц (INSO). В модели OPAC чистого континентального аэрозоля входит 59% частиц WASO и 41% INSO. Для городского аэрозоля в двух моделях также наблюдаются различия. При дальности видимости в 5 км в модели MODTRAN рассеянное излучение (см. табл. 2) составляет 11.6% от пол-

Таблица 3. Относительный массовый состав рассматриваемых аэрозольных моделей

Модель	Тип аэрозоля	WASO, %	INSO, %	SOOT, %
MODTRAN	Urban	56	24	20
	Rural, Tropospheric	70	30	–
OPAC	Городской	56	36	8
	Чистый континентальный	59	41	–
	Средний континентальный	58	40	2
	Загрязненный континентальный	66	30	4

Таблица 4. Смоделированные сигналы, измеряемые ГКР и составляющая ошибки определения общего содержания метана (в %) за счет пренебрежения при интерпретации аэрозольным рассеянием

Аэрозоль Зенитный угол Солнца	Нет		ГА, VIS = 5 км		ЧКА, VIS = 23 км		ЧКА, VIS = 5 км		ЗКА, VIS = 5 км	
	$\Phi, 10^{-3}$	σ_{tot}	$\Phi, 10^{-3}$	σ_{aer}	$\Phi, 10^{-3}$	σ_{aer}	$\Phi, 10^{-3}$	σ_{aer}	$\Phi, 10^{-3}$	σ_{aer}
30°	96.83	3.53	96.82	0.15	96.83	0.06	96.81	0.29	96.82	0.22
50°	93.91	3.23	93.90	0.15	93.90	0.06	93.89	0.23	93.89	0.18
70°	85.98	2.84	85.98	0.03	85.97	0.03	85.98	0.03	85.98	0.00

Примечание: ГА – городской аэрозоль; ЧКА – чистый континентальный аэрозоль; ЗКА – загрязненный континентальный; VIS – дальность видимости.

ного потока, в нашей модели – 6.6% (см. табл. 1). Состав городского аэрозоля также имеет отличия в процентном соотношении не растворимых в воде и сажевых частиц (SOOT): в модели MODTRAN это 24 и 20%, в модели OPAC – 36 и 8% (см. таб. 3).

Таким образом, рассмотренные различия в полученных значениях ослабленного и рассеянного излучения связаны как с различием в аэрозольных моделях, так и в методах расчета излучения. Вынужденное использование различных аэрозольных моделей не позволяет сравнивать абсолютные значения сигналов, полученные разными программами, но дает возможность выявлять их относительные изменения. Несмотря на описанные различия в полученных результатах, можно отметить, что для обоих методов расчета потоков солнечного излучения полученные величины вклада рассеянного излучения в суммарный поток, пришедший на вход прибора, составляют в среднем единицы процентов. Проведенный анализ, во-первых, позволил сделать вывод о влиянии рассеяния на аэрозольных частицах на величину потока нисходящего солнечного излучения, во-вторых, явился независимой проверкой разработанного алгоритма расчета.

Нами также проведена серия расчетов, результаты которых дают возможность оценить влияние вклада рассеяния при рассматриваемой геометрии прибора на погрешность определения общего содержания метана. С учетом параметров оптического и газокорреляционного фильтра (давление метана в кювете 1000 мбар, длина кюветы – 10 см, одна кювета с метаном – другая – с нейтральным газом, краткое описание устройства прибора см. в работе [2]), нами были получены оценки погрешности определения содержания метана. Напомним, что выбранные для расчетов параметры оптического и газокорреляционного фильтров опираются на оценки их оптимальных значений, приведенные в работе [2]. Полученные результаты представлены в табл. 4. В колонке σ_{tot} приведена погрешность определения содержания метана, вызванная неопределенностью параметров атмосферы (содержания “мешающих газов”) и аппаратур-

ной погрешностью. В колонках σ_{aer} приведена погрешность, которая возникнет при интерпретации измерений в рассеивающей (на аэрозоле) атмосфере в случае использования результатов расчетов, учитывающих только прямое солнечное излучение. Видно, что последняя погрешность не превосходит 0.29%, что более чем на порядок меньше погрешности σ_{tot} . Таким образом, влияние аэрозольного рассеяния оказывается существенно меньшим суммарной погрешности измерения общего содержания метана, т.е. рассеяние на аэрозолях может не учитываться при интерпретации радиометрических измерений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Представленные в настоящей работе результаты позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Разработаны физико-математическая модель, алгоритмы и программы для расчета сигналов, регистрируемых газо-корреляционным прибором в полосе поглощения метана 2.2 мкм для наземной и самолетной геометрии измерений с учетом рассеяния.

2. Сравнение потоков нисходящего солнечного излучения, поступающих на вход прибора из верхней полусферы, рассчитанных по оригинальной разработанной программе и по программе MODTRAN продемонстрировало удовлетворение с учетом различия исходных аэрозольных моделей соответствию результатов.

3. Получены оценки потенциальных погрешностей определения общего содержания метана в атмосфере газокорреляционным методом в полосе поглощения метана 2.2 мкм при наземных измерениях, которые составляют 2.8–3.5%, в зависимости от зенитного угла Солнца.

4. В условиях безоблачной атмосферы для рассмотренных характеристик прибора и условий измерений и широкого спектра аэрозольных моделей пренебрежение рассеянием солнечного излучения приводит к ошибкам, на порядок меньшим погрешности определения общего содержания

метана. Таким образом, в рассмотренном типе измерений можно не учитывать как рассеяния, так и ослабление солнечного излучения аэрозольными частицами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-05-65392) и администрации Санкт-Петербурга (грант PD03-1.5-114).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pan L., Edwards D.P., Gille J.C. et al. Satellite remote sensing of tropospheric CO and CH₄: forward model studies of the MOPITT instrument // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. № 30. P. 6976–6988.
2. Виролайнен 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 аэрокосмических платформ // *Исслед. Земли из космоса*. 2002. № 6. С. 39–48.
3. Виролайнен Я.А., Поляков А.В. Алгоритм прямого расчета функций пропускания в задачах наземного дистанционного зондирования атмосферы // *Вестн. СПб ун-та. Сер. 4*. 1999. Вып. 1. (№4). С. 25–31.
4. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Теоретические основы атмосферной оптики. СПб: Наука, 2003. 475 с.
5. Berk A., Robertson D.C. MODTRAN: A moderate spectral resolution LOWTRAN. Proceedings of the 12th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models / Ed. by E.P. Shettle, and F.X. Kneizys. 16 Oct. 1989. P. 129–144.
6. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosol and clouds: The software package OPAC // *Bull. Meteor. Soc.* 1998. V. 79. № 5. P. 831–844.
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. Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Статистические модели тропосферного аэрозоля // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. № 2 (В печати).

Calculation of Scattering of Radiation in Ground-Based Measurements of Total Methane Absorption

Ya. A. Vorolainen, A. V. Polyakov

Scientific Research Institute of Physics, St. Petersburg National Military University

New radiation code for calculations of registered by gas-correlation radiometers signals in 2.2 μm methane absorption band has been developed. This code is intended for airborne measurements as well as for ground-based geometry and involves consideration of aerosol scattering in clear-sky atmosphere. The comparison of downwelling direct and scattering solar radiation fluxes calculated by suggested code and by MODTRAN software demonstrates good coincidence of both results.