

ЛИДАРНЫЙ МЕТОД УТОЧНЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФОНОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В УСЛОВИЯХ ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

© 2021 г. В. И. Григорьевский^а, *, Я. А. Тезадов^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: vig248@rambler.ru

Поступила в редакцию 07.12.2020 г.

После доработки 07.12.2020 г.

Принята к публикации 27.01.2021 г.

Проведено моделирование уточнения вертикального профиля концентрации метана в атмосфере Земли при отсутствии прямой видимости на трассе космический аппарат–поверхность Земли. Для целей моделирования вертикальный профиль концентрации метана аппроксимирован многочленным шестой степени, а уточнение профиля проводили варьированием его коэффициентов до совпадения с экспериментальными данными. Приведены экспериментальные данные зондирования метана с поверхности Земли, когда применение метода ограничено или не совсем достоверно. Рекомендовано для повышения разрешающей способности лидара в выделенных областях на поверхности Земли применять сканирование приемопередатчика, обеспечивающее фиксацию луча в заданной точке при пролете спутника по траектории орбиты.

DOI: 10.31857/S0033849421070044

ВВЕДЕНИЕ

Метан является одним из активных парниковых газов в атмосфере Земли, влияя на формирование климата на планете и участвуя во многих химических реакциях в тропосфере и стратосфере [1]. После небольшого перерыва, с 1999 до 2005 г., концентрация метана снова начала увеличиваться со скоростью ~6 частей на 1 млрд в год (6 ppb/год) [2]. Это связано с возможным таянием вечной мерзлоты, возросшей хозяйственной деятельностью человека, некоторыми другими факторами. Мониторинг метана из космоса может уточнить прогнозы по динамике развития процесса накопления метана в атмосфере и, возможно, смягчить последствия от глобального потепления климата. Многие спутники, находящиеся в настоящий момент на орбитах, имеют на борту как активные, так и пассивные датчики метана, работающие на различных принципах, уточняющие распределение метана в пространстве [3]. Однако активных лидаров, как наиболее точных, в настоящее время мало. Проект Merlin по определению глобального распределения метана со спутника, возглавляемый двумя группами из французской LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) и Немецкого института физики атмосферы при дополнительной поддержке нескольких французских и немецких исследовательских институтов на базе Герман-

ского центра космических и воздушных полетов (DLR), планируют осуществить в 2021 г. [3]. В данном проекте рассматривается возможность измерения интегральной концентрации метана в столбе атмосферы с точностью в единицы процентов. Активный метод измерений основан на дифференциальном поглощении оптического излучения в линии и вне линии поглощения метана. В передатчике газоанализатора планируется использовать параметрический генератор света с мощностью в импульсе ~50...100 кВт, а в фотоприемнике – высокочувствительный лавинный фотодиод, работающий в диапазоне инфракрасных длин волн ~1650 нм. В ходе исследований альтернативного активного метода с квазинепрерывным лидаром на борту выявлена возможность применения его на космическом аппарате (КА). Как показывает расчет, мощность передатчика такого лидара должна быть не менее 30 Вт [4]. В данном методе лидар излучает лазерный луч с линейно-частотной модуляцией на длине волны света, совпадающей с линией поглощения газа (например, с линией R3 поглощения метана на длине волны ~1653.7 нм), а затем принимает отраженное от Земли излучение и обрабатывает соответствующим образом получаемые данные с целью определения как интегральной концентрации газа на трассе распространения, так и шири-

ны линии поглощения. В процессе мониторинга часто возникали ситуации, когда отсутствовала прямая видимость между КА и Землей, причинами этого являлись облачность на трассе измерений, различные выбросы вулканической и иной деятельности в атмосфере Земли: дымка, туманы, снегопады и т.д. Возникает вопрос, можно ли уточнить в этих условиях по получаемым данным распределение концентрации газа в пространстве на всей трассе измерений, несмотря на отсутствие прямой видимости между КА и Землей, и с какой достоверностью.

Цель работы — моделирование метода восстановления распределения концентрации метана в пространстве на основе лидарных измерений с космической орбиты и уточнение вертикального профиля фоновой концентрации газа в условиях замутненной атмосферы, а также поиск возможных методов повышения разрешающей способности лидарных измерений в таких условиях.

1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФОНОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В УСЛОВИЯХ ПРЯМОЙ ВИДИМОСТИ И В СЛУЧАЕ НАЛИЧИЯ ПЛОТНОГО ОБЛАЧНОГО СЛОЯ НА ТРАССЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Известно, что в случае прямой видимости на трассе измерений лидар принимает отраженное от Земли излучение с уровнем мощности $\sim 10^{-11} \dots 10^{-12}$ Вт при применении квазинепрерывного лидара с выходной мощностью передатчика ~ 30 Вт при радиусе приемного объектива 0.5 м [4]. В данном случае отношение сигнал/шум может составлять величину ~ 100 при усреднении результатов измерений за время 1...10 с при использовании высокочувствительных лавинных фотодиодов с порогом обнаружения $\sim 3.2 \times 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}, что дает разрешение по горизонтали $\sim 40 \dots 80$ км при скорости движения КА по орбите ~ 7.8 км/с [5]. Основными источниками шумов лидара являются шумы темнового тока фотоприемника, солнечная засветка, а также обратное молекулярное или аэрозольное рассеяние атмосферы, составляющее величину $\sim 10^{-11} \dots 10^{-13}$ Вт в зависимости от погодных условий. Однако в случае отсутствия прямой видимости принимаемое обратное рассеяние является информативным сигналом (полезный эффект), по которому можно судить о вертикальном профиле концентрации газа в атмосфере на всей трассе вплоть до поверхности Земли. Квазинепрерывный лидарный метод позволяет измерять усредненные величины осаждаемого слоя метана и ширины его линии поглощения на трассе до точки отражения. В случае замутненной атмосферы этой точкой является облако, аэрозоль, туман и т.д.

Предлагаемая методика экстраполяции данных под облачный слой основывается на статистической функции (профиле) $f(x)$ распределения концентрации газа по высоте [6] в нормальных условиях с хорошей видимостью на всей трассе. Эта функция позволяет определить средний по трассе измерения осаждаемый слой метана $l(h)$ как интеграл по высоте от произведения указанной функции на барометрический экспоненциальный множитель падения атмосферного давления с высотой:

$$l(h) = \int_0^h f(75 - x) \exp(-(75 - x)/8.9) dx. \quad (1)$$

Здесь h — текущая высота, а за точку отсчета $f(0)$ принято расстояние над поверхностью Земли, равное 75 км, где функция $f(x)$ обращается в нуль. Интегрирование ведется до высоты h по направлению к Земле (в силу этого расстояние с $h = 75$ км — это уровень поверхности Земли). Подынтегральная функция $\exp(-(75 - x)/8.9)$ — это барометрический коэффициент падения давления с высотой, который при $x = 75$ км (поверхность Земли) обращается в единицу. Статистическая функция $f(x)$ хорошо аппроксимируется многочленом шестой степени, при этом он выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} f(x) = & 2.35816 \times 10^{-10} (75 - x)^6 - \\ & - 4.85176 \times 10^{-8} (75 - x)^5 + \\ & + 3.20739 \times 10^{-6} (75 - x)^4 - \\ & - 4.82155 \times 10^{-5} (75 - x)^3 - \\ & - 1.975395 \times 10^{-3} (75 - x)^2 + \\ & + 1.9504372 \times 10^{-2} (75 - x) + 1.676475562. \end{aligned} \quad (2)$$

График многочлена (2) представлен на рис. 1. По аналогии с барометрической эта зависимость представлена для аргумента $(75 - x)$ так, чтобы при $x = 75$ км она обращалась в среднюю концентрацию метана у поверхности Земли ~ 1.7 ppm (молекул на миллион). Такая аппроксимация среднестатистического распределения метана по высоте, не отличается от представленной в [6] более чем на ± 0.01 ppm ($\sim 0.5\%$) и ее с хорошей точностью можно использовать в моделировании и вычислениях. В свою очередь, усредненная по высоте ширина линии поглощения метана 2γ записывается в следующей форме:

$$2\gamma = \frac{1}{h} \int_0^h 2\gamma_0 f'(75 - x) \exp(-(75 - x)/8.9) dx, \quad (3)$$

где $f'(75 - x)$ — нормированная на единицу статистическая функция распределения концентрации метана по высоте, а $2\gamma_0 = 0.0618$ нм — ширина его линии поглощения в приземном слое атмосферы.

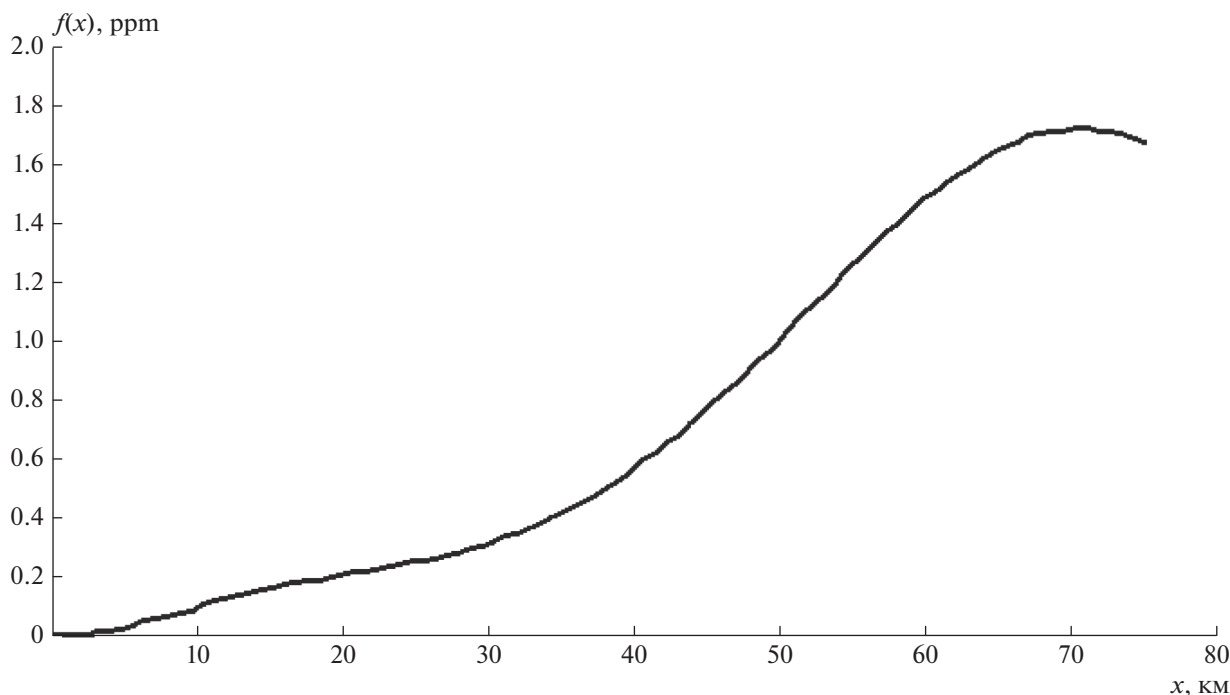


Рис. 1. Аппроксимация статистической функции $f(x)$ распределения метана по высоте.

Для прозрачной атмосферы на основе полученных экспериментальных данных среднего осажденного слоя метана и ширины линии поглощения можно уточнить стандартное распределение газа по высоте, решая обратную задачу. В случае отклонения концентрации газа и ширины линии поглощения от стандартных величин ищем такое распределение, которое мало отличается от получаемых в эксперименте данных. При наличии плотного облачного слоя между Землей и КА возможно получить от этого слоя достаточный для регистрации отраженный сигнал. В данном случае рассматриваются измерения с космической орбиты. Например, если облако расположено на высоте ~ 10 км над Землей и имеет показатель преломления $n \sim 1.3$ (вода), то коэффициент отражения от него, рассчитанный по формулам Френеля, составляет величину около 2%, что сопоставимо с альбедо черной Земли ($\sim 2...5\%$), а принимаемый отраженный сигнал составит $P_{отр} \sim 3 \times 10^{-12}$ Вт для указанных выше параметров лидарной системы. К этому сигналу надо добавить сигнал рассеяния в облачном слое $P_{расс}$. Например, если облако состоит из капель с радиусом ~ 0.1 мкм (наиболее вероятный размер капель, при котором частицы могут долго парить и не оседать в воздухе [7]) с плотностью рассеивающих частиц (плотность дисперсной фазы) $N_0 \sim 2 \times 10^{16}$ $1/\text{м}^3$ у поверхности Земли, то на расстоянии в $\sim 0.05...0.1$ м в этом облаке в телесном угле 4π произойдет полное рассеяние света $P_{общ}$.

Такая оценка получена на основании формулы общей рассеянной мощности в облаке в телесном угле 4π [8]:

$$P_{общ} \approx 4P_0 \left(\frac{9\pi^3 V^2}{\lambda^4} \right) \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 NL, \quad (4)$$

где $P_0 = 30$ Вт — излучаемая лидаром мощность, $N = 7.2 \times 10^{15}$ — число рассеивающих частиц в 1 м^3 на высоте 10 км, V — объем рассеивающей частицы радиусом ~ 0.1 мкм, $\lambda = 1.65$ — длина волны излучения, L — длина, на которой происходит основное рассеяние света (~ 0.1 м), n_1 и n_2 — показатели преломления дисперсной фазы и дисперсной среды соответственно равные 1.33 и 1.

В формуле (4) сделано следующее допущение: индикатриса рассеяния одиночной частицы изотропна и определяется произведением выражений в круглых скобках формулы (4). Интерпретация данной формулы заключается в суммировании рассеянной мощности света от всех частиц, находящихся на пути луча в рассматриваемом слое в телесном угле 4π . При этом на приеме можно получить $P_{расс} \sim 4 \times 10^{-12}$ Вт рассеянной мощности для указанной плотности рассеивающих частиц и расстояния от КА до отражающего облака ~ 440 км (10 км над поверхностью Земли). Такой уровень принимаемой лидаром рассеянной мощности $P_{расс}$ получен из нижеследующей формулы (5), вытекающей из формулы (4), для облачного слоя толщи-

ной $\sim 0.05 \dots 0.1$ м в рассеивающем телесном угле, стягиваемом приемным объективом лида:

$$P_{\text{расс}} \approx \int_{R_0}^{R_0+0.05} P_0 A^2 \left(\frac{9\pi^3 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \times \quad (5)$$

$$\times N_0 (\exp(-(450\,000 - R)/9800)) \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 dR.$$

Здесь $A = 0.5$ м — радиус приемного объектива лида, R_0 — расстояние от лида до рассеивающего слоя (~ 440 км), $N_0 = 2 \times 10^{16}$ — число рассеивающих частиц в 1 м^3 вблизи поверхности Земли, остальные обозначения те же, что и для формулы (4). Интерпретация формулы (5) заключается в суммировании рассеянной мощности света, попадающей в приемный объектив лида, от всех частиц, находящихся на пути луча в слое толщиной ~ 0.05 м. Экспонента, стоящая под знаком интеграла, отражает барометрический коэффициент падения концентрации с высотой. Таким образом, результат принимаемой лидаром мощности от облачных образований $P_{\text{лид}} = P_{\text{отр}} + P_{\text{расс}}$ увеличивается, в частности, с количеством и размером рассеивающих частиц.

В рассматриваемом примере расположения плотного облака на высоте ~ 10 км над Землей можно точно решить обратную задачу для определения функции распределения концентрации метана при изменении высоты от облака до вышележащих слоев атмосферы, а условие непрерывности функции распределения концентрации метана и ее производных — для аппроксимации и определения распределения концентрации газа непосредственно под облаком, вплоть до поверхности Земли.

Основными данными для такого определения концентрации являются измеренные величины средней ширины линии поглощения газа, среднего осажденного слоя на измеряемом участке трассы и расстояние от КА до облачного слоя. При дальнейших измерениях на данном участке траектории КА в случае наличия прямой видимости на трассе, возможно уточнение полученных результатов.

Упрощенный алгоритм обработки сигнала и уточнения профиля статистической функции распределения метана при изменении высоты на всей трассе представлен на рис. 2. Уточнение профиля концентрации метана сводится в простейшем случае к подбору постоянной составляющей и коэффициента при линейном члене выражения (2). Если, например, измеренное значение осажденного слоя больше, а ширина линии меньше чем теоретические значения, полученные для нормального профиля концентрации, то профиль будет соответствовать кривой 2 на рис. 3, а не кривой 3. Подтверждающие этот вывод цифры при-

ведены ниже. Если облачный слой находится на расстоянии, например, 10 км над Землей, то нормальному профилю концентрации (кривая 1) соответствует значение осажденного слоя метана 14.983 мм и ширина линии поглощения $\sim 2.14 \times 10^{-3}$ нм. Предположим, что в эксперименте получены соответственно следующие значения: 15.93 мм и 2.077×10^{-3} нм. Видно, что средний осажденный слой метана примерно на 1 мм ($\sim 7\%$) больше, чем для стандартного профиля. Подбор коэффициентов при линейном и постоянном членах выражения (2) дает следующий вид функции $f(x)$, удовлетворяющей экспериментальным данным:

$$f(x) = 2.35816 \times 10^{-10} (75 - x)^6 -$$

$$- 4.85176 \times 10^{-8} (75 - x)^5 +$$

$$+ 3.20739 \times 10^{-6} (75 - x)^4 -$$

$$- 4.82155 \times 10^{-5} (75 - x)^3 -$$

$$- 1.975395 \times 10^{-3} (75 - x)^2 +$$

$$+ 1.5504372 \times 10^{-2} (75 - x) + 1.826475562. \quad (6)$$

Профиль, соответствующий кривой 3 на рис. 3, отличающийся от стандартного профиля только постоянным членом (1.776 вместо 1.676), также дает значение осажденного слоя метана ~ 15.98 мм, однако ширина линии поглощения для такой кривой, как показывает расчет по формуле (3), равна 2.18×10^{-3} мм и примерно на 5% больше, чем измеренное значение. Для кривой 2 ширина линии поглощения составляет величину 2.08×10^{-3} нм, что делает ее более вероятным профилем распределения. Величину изменения в 5% в ширине линии поглощения можно зафиксировать при соответствующем соотношении сигнал/шум для используемой измерительной аппаратуры [5].

Однако не всегда можно определить профиль метана за облачным слоем. Например, при измерениях, когда зондирование производилось с поверхности Земли до сравнительно плотных облачных слоев, находящихся на высотах 1.5 и 3.4 км [5], нельзя уточнить профиль по всей высоте. Экспериментально полученные в указанной работе данные по концентрации метана оказались равными соответственно 2.125 и 4.59 мм осажденного слоя метана. Если вычислить теоретические значения соответствующих величин по формулам (1)–(3) для стандартного распределения газа, то значения получаются следующими: 2.33 и 4.81 мм, что больше, чем в эксперименте (ошибка получения экспериментальных данных не превышала 3%). Поэтому чтобы удовлетворялись экспериментальные данные, постоянный член (2) должен быть равен 1.576. В этом случае отклонение от эксперимента не превышает значения 0.07 единиц или менее 3%, а именно: 2.19 и 4.52 мм осажден-



Рис. 2. Упрощенный алгоритм определения вертикального профиля распределения концентрации метана на разной высоте.

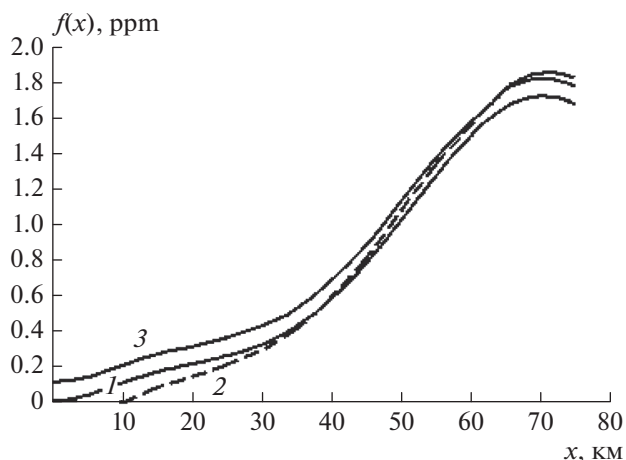


Рис. 3. Профили концентрации метана: 1 – нормальный, 2 – с увеличенным осажденным слоем метана в тропосфере и уменьшенным осажденным слоем в стратосфере (ширина линии поглощения 2.08×10^{-3} нм), 3 – с увеличенным осажденным слоем метана в тропосфере и стратосфере (ширина линии поглощения 2.18×10^{-3} нм).

ного слоя метана. Но в данном случае распределение метана по высоте будет неопределенно и выглядеть или как кривая 1 (постоянный член равен 1.576), или как кривая 2 с коэффициентом при линейном члене, равном 0.022504372, и постоянным членом, равным 1.576, или как кривая 3 с коэффициентом при линейном члене 0.015504372 и постоянным членом 1.576 (рис. 4), поскольку во всех трех случаях расчетная и полученная экспериментально ширина линии поглощения совершенно одинаковы: для низкого облачного слоя 1.5 км она равна 0.057 нм, а для высокого облачного слоя 3.4 км – 0.051 нм. Такой вариант неоднозначности профиля при измерениях с Земли закономерен, поскольку мала высота зондирования, а ширина линии поглощения и концентрация газа на приземных высотах меняются достаточно слабо.

Иначе обстоит дело при зондировании метана со спутника. В этом случае часть трассы от высот орбиты порядка 450 км до высот в ~ 10 км (это

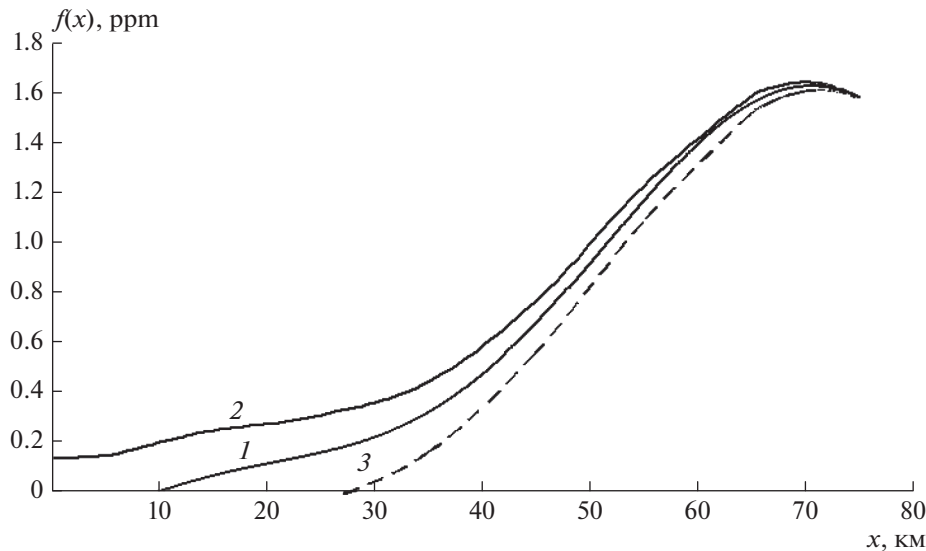


Рис. 4. Распределения концентрации метана по высоте, удовлетворяющие экспериментальным данным при зондировании с Земли: 1 — постоянный член равен 1.576; 2 — коэффициент при линейном члене равен 2.2504372×10^{-2} , постоянный член 1.576; 3 — коэффициент при линейном члене равен 1.5504372×10^{-2} , постоянный член 1.576.

примерно максимальная высота облачных слоев) большую часть времени наблюдений имеет прямую видимость, и поэтому измерения по изложенной методике становятся достоверными с возможностью последующего уточнения данных измерений при появлении прямой видимости на трассе КА—Земля.

2. УТОЧНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ФОНОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ПРИ НАЛИЧИИ “РЫХЛОГО” ТУМАНА НА ТРАССЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для случая облаков типа тумана, когда в воздухе находятся достаточно “рыхлые” образования, например из мелких водяных капель, можно также рассчитать принимаемый сигнал, основываясь на обратном рассеянии Рэлея для малых по сравнению с длиной волны частиц или рассеянии Ми (при длине волны излучения лидара сравнимой с размером рассеивающих частиц). Например, если расстояние, на котором происходит полное рассеяние света, составляет ~ 10 км над поверхностью Земли, то плотность частиц “рыхлого” облака (или тумана) должна составлять величину в $\sim 10^5$ раз меньше, чем в приведенном выше случае плотного облака $N_0 \sim 2 \times 10^{16} \text{ 1/м}^3$ ($10 \text{ км}/0.1 \text{ м} = 10^5$), т.е. $N_0 \sim 2 \times 10^{11} \text{ 1/м}^3$ частиц радиусом ~ 0.1 мкм. В этом случае рассеяние происходит во всем 10-километровом слое тумана вплоть до поверхности Земли, в основном в нижнем слое протяженностью $\sim 5\text{--}10$ км. Поскольку результат

принимаемой рассеянной мощности сильно зависит от плотности и размеров рассеивающих частиц, то в процессе зондирования желательно иметь информацию о составе среды рассеяния, в качестве которой можно использовать, например, синхронную фотографию трассы измерения и величину принимаемого сигнала. В случае “рыхлого” тумана (концентрация частиц у поверхности Земли $N_0 \sim 2 \times 10^{11} \text{ 1/м}^3$) мощность $P_{\text{лид}}$, принимаемая лидаром и получаемая от слоя атмосферы толщиной 5000 м, находящегося на расстоянии R_0 от лидара, можно определить по аналогичной (5) формуле:

$$P_{\text{лид}} \approx \int_{R_0}^{R_0+5000} P_0 \pi A^2 \left(\frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) \times N(\exp((450000 - R)/9800)) \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 dR. \quad (7)$$

Здесь суммируется рассеянная мощность света, попадающая в приемный объектив лидара, от частиц, находящихся на пути луча в слое толщиной 5000 м.

Графически мощность, принимаемая лидаром и рассчитанная по формуле (7), представлена на рис. 5. Из рисунка видно, что основной источник лидарного сигнала — это нижний слой атмосферы высотой ~ 10 км. Определим наиболее вероятную область отражения лазерного луча как центр тяжести фигуры, ограниченной графиком. Нетрудно подсчитать, используя (7), что эта точка находится на расстоянии ~ 7 км от поверхности Земли.

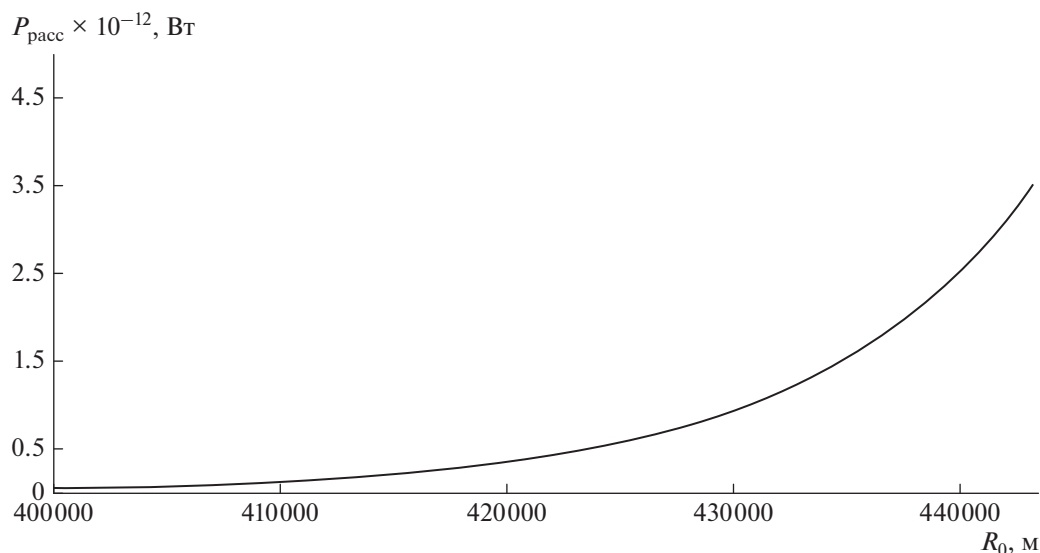


Рис. 5. Зависимость мощности, попадающей в приемный объектив лидара, от расстояния зондирования для слоя рассеяния 5000 м.

Таким образом, считая, что лидар имеет датчик расстояния, дающий в случае рыхлого тумана неопределенное расстояние до области отражения из-за значительного разброса времени прихода отраженного импульса, можно считать достоверной областью отражения, расстояние в ~ 7 км над поверхностью Земли. Расстояние до точки отражения желательно оценивать с точностью до ~ 1000 м. В этом случае результаты аппроксимации профиля концентрации получаются точнее. В квазинепрерывных лидарах с прямым фотодетектированием принимаемых сигналов есть возможность определения расстояния до объекта отражения, например, по заднему фронту спадающего принятого квазиимпульса [9], но в случае рыхлого тумана такой измеритель может давать большие погрешности, порядка нескольких километров. Алгоритм восстановления профиля концентрации в данном случае такой же, как на рис. 2, однако расстояние до точки отражения принимаем равным 7 км над уровнем Земли (443 км от орбиты КА).

При рассмотрении варианта облачности, промежуточной между рассмотренными выше крайними случаями, когда плотные облака находятся в более низком слое тропосферы или наблюдается не «рыхлый» туман, а туман с более высокой концентрацией капель, расстояние до области отражения может быть измерено датчиком расстояния в пределах указанной точности ~ 1000 м, и этого достаточно для уточнения профиля концентрации метана на протяжении всей трассы также с разрешением ~ 1000 м.

В заключение остановимся на методе повышения разрешающей способности космических ли-

даров, который, по нашему мнению, возможен в технической реализации лидарного сканирования. Как видно из представленных выше расчетов, наиболее вероятные принимаемые лидаром уровни мощности сигналов в заданном диапазоне длин волн составляют величины $\sim 10^{-11} \dots 10^{-12}$ Вт, и такие мощности находятся на пределе чувствительности современных фотоприемников, например, на основе лавинных фотодиодов. В силу этого разрешающая способность космических лидаров (как квазинепрерывных, так и импульсных) составляет величину ~ 50 км в горизонтальной плоскости при достаточно длительном усреднении $\sim 5 \dots 10$ с. За это время спутник пролетает расстояние $\sim 40 \dots 80$ км.

Однако для объектов повышенного интереса, например магистральных газопроводов, газохранилищ и т.д., есть возможность повысить область локализации зондирования, немного усложнив аппаратуру лидара на КА с целью возможности удержания пятна лазера на интересующей области отражения (рис. 6). В изображенном на рисунке варианте, приемопередатчик лидара при движении КА по орбите поворачивается на небольшой угол с целью поддержания пятна лазера в заданной области отражения. Нетрудно оценить точность поворота приемопередатчика в таком режиме сканирования. Если пятно у поверхности Земли имеет размер $\sim 100 \times 100$ м, а высота орбиты ~ 450000 м, то точность поворота приемопередатчика составит $\sim 1/4500$ рад = 0.8 угл. мин, что вполне достижимо технически. В данном случае пространственное разрешение лидарных измерений в горизонтальной плоскости составит вели-

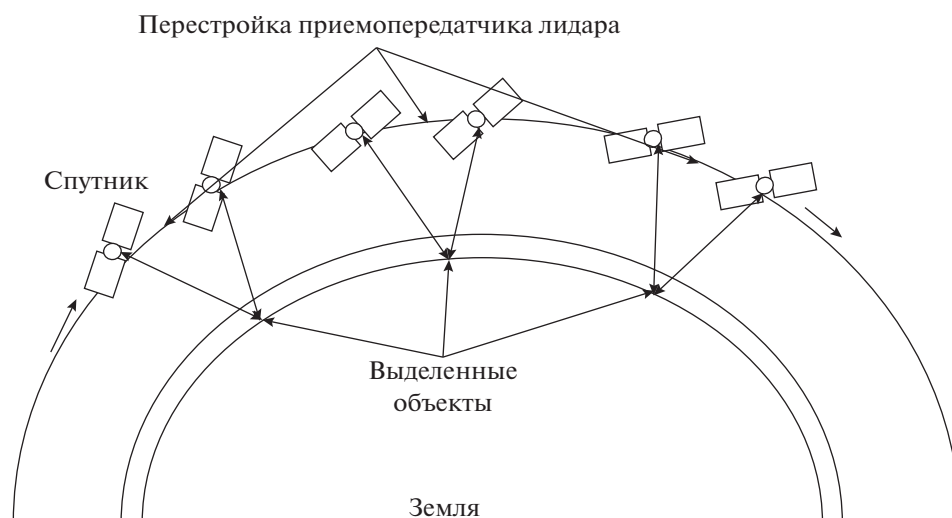


Рис. 6. Сканирование выделенных объектов с высоким пространственным разрешением.

чину порядка размера пятна излучения, т.е. ~100...200 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено моделирование уточнения вертикального профиля концентрации метана в атмосфере Земли при отсутствии прямой видимости на трассе КА—поверхность Земли. Поскольку на высоких широтах облачность значительное время закрывает поверхность Земли, важно использовать все возможности, чтобы не было значительных окон неопределенности в получаемых данных на всей трассе, включая нижнюю тропосферу. Предложенная методика использования отраженного и рассеянного сигнала от облаков и облачных (или аэрозольных) образований и экстраполирование данных по вертикальному профилю метана на всю трассу при отсутствии прямой видимости поверхности Земли может исключить отсутствие информации и повысить точность и достоверность статистических данных по определению концентрации метана, а следовательно, и по влиянию его на динамику климата в целом. Для повышения разрешающей способности лидара для особо важных областей на поверхности Земли возможно применение сканирования приемопередатчика, обеспечивающее неподвижность луча в заданной области отражения при пролете спутника по траектории орбиты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0030-2019-0008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shindel D.T., Faluvegi G.S., Koch D.M. et al. // Science. 2009. V. 326. P. 716.
2. Nisbet G.N., Dlugokencky E.J., Bousquet P.E. // Science. 2014. V. 343. P. 493.
3. Weidmann D., Hoffmann A., Macleod N. et al. // Remote Sens. 2017. V. 9. № 1073. P. 1.
4. Акимова Г.А., Григорьевский В.И., Матайбаев В.В. и др. // РЭ. 2015. Т. 60. № 10. С. 1010.
5. Григорьевский В.И., Тезадов Я.А. // Космич. исслед. 2020. Т. 58. № 5. С. 369.
6. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде. Новосибирск: Изд-во РАН, 2010.
7. Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей, курс лекций. Екатеринбург: Уральский ун-т, 2008.
8. Новикова В.А., Варжель С.В. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2019.
9. Григорьевский В.И., Садовников В.П., Тезадов Я.А. и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 6. С. 32.
10. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007.