

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Моделирование измерений концентрации метана лидаром в замутненной атмосфере

В.И.Григорьевский, Я.А.Тезадов

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1
E-mail: vig248@ire216.msk.su; vig248@rambler.ru*

Проведено моделирование уточнения вертикального профиля концентрации метана в атмосфере Земли при отсутствии прямой видимости на трассе космический аппарат (КА) – поверхность Земли. На высоких широтах облачность значительное время закрывает поверхность Земли, поэтому важно использовать все возможности, чтобы не было значительных окон неопределенности в получении данных на всей трассе, включая нижнюю тропосферу. Для целей моделирования вертикальный профиль концентрации метана аппроксимирован многочленом шестой степени, а уточнение профиля проводилось варьированием его коэффициентов до совпадения с экспериментальными данными. Предложенная методика использования отраженного и рассеянного сигнала от облаков и облачных образований и экстраполяция данных по вертикальному профилю метана на всю трассу при отсутствии прямой видимости поверхности Земли обеспечивает бесперебойность в получении данных, тем самым повышает точность и достоверность статистических материалов для определения концентрации метана, а, следовательно, и по влиянию его на динамику климата в целом.

Ключевые слова: лидар, концентрация, метан, профиль, туман, атмосфера, рассеяние

Simulation of methane concentration measurements by lidar in a cloudy atmosphere

V. I. Grigorievsky, J. A. Tezadov

Fryazino Branch of the Institute of Radio Engineering and Electronics. V.A. Kotelnikov RAS, Russian Federation, 141190 Fryazino, Moscow region, pl. Vvedensky, 1

Simulation of the vertical profile of methane concentration in the Earth's atmosphere is simulated in the absence of direct visibility on the spacecraft (SC) - Earth surface route. At high latitudes, clouds cover the Earth's surface for a significant time, so it is important to use all possibilities so that there are no significant windows of uncertainty in data acquisition along the entire path, including the lower troposphere. For modeling purposes, the vertical profile of methane concentration was approximated by a sixth-degree polynomial, and the profile was refined by varying its coefficients until they coincide with the experimental data. The proposed method of using the reflected and scattered signal from clouds and cloud formations and extrapolating data along the vertical profile of methane to the entire path in the absence of direct visibility of the Earth's surface ensures uninterrupted data acquisition, thereby increasing the accuracy and reliability of statistical materials for determining the methane concentration, and, consequently, and its influence on the dynamics of the climate in general.

Keywords: lidar, concentration, methane, profile, fog, atmosphere, scattering

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 до 2005 года концентрация метана снова начала увеличиваться со скоростью ~ 6 частей на миллиард 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. Европейский спутниковый проект “Merlin” по определению глобального распределения метана планируют осуществить в 2021 году [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 мощный параметрический генератор света с мощностью в импульсе $\sim 50-100$ кВт, а в фотоприемнике – высокочувствительный лавинный фотодиод, работающий в диапазоне инфракрасных длин волн ~ 1650 нм. Исследования альтернативного активного метода с квазинепрерывным лидаром на борту показывают возможность применения его на космическом аппарате (КА). 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 ширины линии поглощения, которую затруднительно определить в методе с параметрическим усилителем, поскольку линия поглощения целиком там не прописывается. В процессе мониторинга часто возникают ситуации отсутствия прямой видимости между КА и Землей. Такие ситуации возникают из-за облачности на трассе измерений, различных выбросов вулканической и иной деятельности в атмосфере Земли: из-за дымки, туманов, снегопадов 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?

Целью работы является 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.

Известно, что в случае прямой видимости на трассе измерений лидар принимает отраженное от Земли излучение с уровнем мощности $\sim 10^{-11} - 10^{-12}$ 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 $\sim 3.2 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}, что даёт разрешение по горизонтали $\sim 40-80$ км при скорости движения КА по орбите ~ 7.8 км/с. Основными источниками шумов лидара являются шумы темного тока фотоприемника, солнечная засветка, а также обратное молекулярное или аэрозольное рассеяние атмосферы, составляющее величину $\sim 10^{-11} - 10^{-13}$ 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 осажденного 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 [5] в нормальных условиях с хорошей видимостью на всей трассе. Эта функция позволяет определить средний по трассе измерения осажденный 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). Подинтегральная функция $\exp(-(75-x)/8.9)$ - это барометрический коэффициент падения давления с высотой, который при $x=75$ км (поверхность Земли) обращается в единицу. Функция $f(x)$ хорошо аппроксимируется многочленом шестой степени, при этом он выглядит следующим образом:

$$f(x) = 2.35816 \cdot 10^{-10} (75-x)^6 - 4.85176 \cdot 10^{-8} (75-x)^5 + 3.20739 \cdot 10^{-6} (75-x)^4 - 4.82155 \cdot 10^{-5} (75-x)^3 - 0.001975395 (75-x)^2 + 0.019504372 (75-x) + 1.676475562 \quad (2)$$

График многочлена (2) представлен на рис.1. По аналогии с барометрической эта

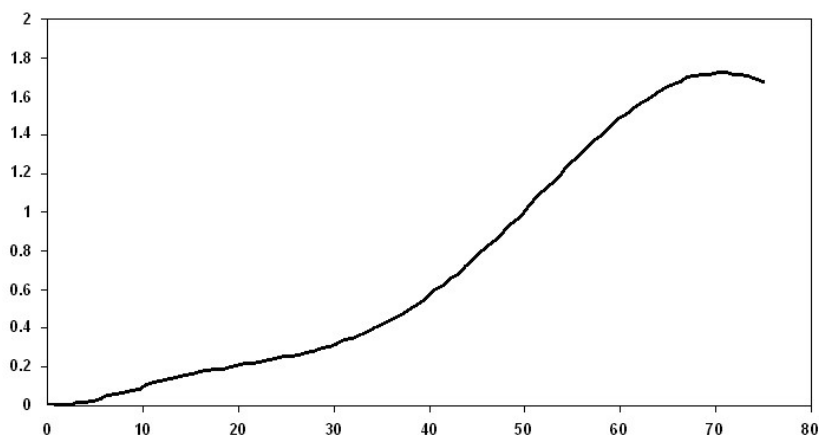


Рис.1. Аппроксимация статистической функции $f(x)$ распределения метана по высоте

зависимость представлена для аргумента $(75 - x)$ так, чтобы при $x=75$ км она обращалась в среднюю концентрации метана у поверхности Земли ~ 1.7 ppm (молекул на миллион). Такая аппроксимация среднестатистического распределения метана по высоте, не отличается от представленной в [5], 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. 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 ищется 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 $P_{refl} \sim 3 \cdot 10^{-12}$ Вт для указанных выше параметров лидарной системы. К этому сигналу надо добавить сигнал рассеяния в облачном слое P_{scatt} . 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 [6]) с плотностью рассеивающих частиц (плотность дисперсной фазы) $N_0 \sim 2 \cdot 10^{16}$ 1/м³ 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_{tot} . Такая оценка получена на основании формулы общей рассеянной мощности в облаке в телесном угле 4π [7]:

$$P_{tot} \approx 4P_0 \left(\frac{9\pi^3 V^2}{\lambda^4} \right) \cdot \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 N \cdot L \quad (4)$$

где $P_0 = 30$ Вт – излучаемая лидаром мощность, $N = 7.2 \cdot 10^{15}$ – число рассеивающих частиц на высоте 10 км, V – объем рассеивающей частицы радиусом ~ 0.1 мкм, $\lambda = 1.65$ - длина волны излучения, L – длина, на котором 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 $P_{scatt} \sim 4 \cdot 10^{-12}$ Вт рассеянной мощности при указанной плотности рассеивающих частиц и расстоянии отражающего облака от КА в ~ 440 км (10 км над поверхностью Земли). Такой уровень принимаемой лидаром рассеянной мощности P_{scatt} получен из нижеследующей формулы (5) по аналогии с формулой (4) для слоя плотного облака толщиной $\sim 0.05-0.1$ м в телесном угле, стягиваемом приемным объективом лидара:

$$P_{scatt} \approx \int_{R_0}^{R_0+0.05} P_0 A^2 \left(\frac{9\pi^3 V^2}{\lambda^4 R^2} \right) N_0 (\exp(-(450000 - R)/9800)) \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2 dR \quad (5)$$

Здесь $A = 0.5$ м - радиус приемного объектива лидара, R_0 – расстояние от лидара до рассеивающего слоя (~ 440 км), $N_0 = 2 \cdot 10^{16}$ – число рассеивающих частиц 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 лидара, 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 $P_{lid} = P_{refl} + P_{scatt}$ увеличивается, в частности, с количеством и размером рассеивающих частиц. В рассматриваемом примере расположения плотного облака на высоте ~ 10 км над Землей можно решить обратную задачу для определения функции распределения концентрации метана с высотой от облака до вышележащих слоёв 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 с высотой на всей трассе выглядит следующим образом, рис.2.



Рис.2. Упрощенный алгоритм определения вертикального профиля распределения концентрации метана с высотой

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 нежели кривой 3, рис. 3. Подтверждающие этот вывод цифры приведены 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 $\sim 2.14 \cdot 10^{-3}$ нм. Предположим, что в эксперименте получены соответственно следующие значения: 15.93 мм и $2.077 \cdot 10^{-3}$ нм. Видно, что средний осажденный слой метана примерно на 1 мм ($\sim 7\%$) больше, чем для стандартного профиля.

$f(x)$, ppm

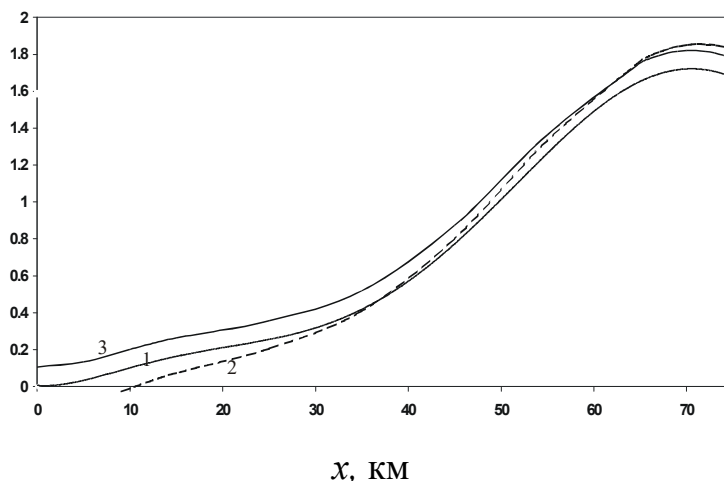


Рис.3. 1 - нормальный профиль концентрации метана, 2- профиль концентрации с увеличенным осажденным слоем метана в тропосфере и уменьшенным осажденным слоем в стратосфере (ширина линии поглощения $2.08 \cdot 10^{-3}$ нм), 3- профиль концентрации с увеличенным осажденным слоем метана в тропосфере и стратосфере (ширина линии поглощения $2.18 \cdot 10^{-3}$ нм)

Подбор коэффициентов при линейном и постоянном членах выражения (2) дает следующий вид функции $f(x)$, удовлетворяющей экспериментальным данным:

$$f(x) = 2.35816 \cdot 10^{-10} (75-x)^6 - 4.85176 \cdot 10^{-8} (75-x)^5 + 3.20739 \cdot 10^{-6} (75-x)^4 - 4.82155 \cdot 10^{-5} (75-x)^3 - 0.001975395 (75-x)^2 + 0.015504372 (75-x) + 1.826475562 \quad (6)$$

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 $2.18 \cdot 10^{-3}$ нм и примерно на 5% больше, чем измеренное значение. Для кривой 2 ширина линии поглощения составляет величину $2.08 \cdot 10^{-3}$ нм, что делает ее более вероятным профилем распределения.

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 или большей размеров 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 $N_0 \sim 2 \cdot 10^{16}$ $1/м^3$ ($10 \text{ км}/0.1 \text{ м} = 10^5$), то есть $N_0 \sim 2 \cdot 10^{11}$ $1/м^3$ частиц радиусом $\sim 0,1$ мкм. В этом случае рассеяние происходит во всем 10 - километровом слое тумана вплоть до поверхности Земли, в основном в нижнем слое протяженностью $\sim 5-10$ км. Поскольку результат принимаемой рассеянной мощности сильно зависит от плотности

и размеров рассеивающих частиц, то в процессе зондирования желательнее 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 $N_0 \sim 2 \cdot 10^{11}$ 1/м³) принимаемая лидаром мощность P_{lid} , получаемая от слоя атмосферы толщиной 5000 м, находящегося на расстоянии R_0 от лидара, можно определить по формуле аналогичной (5):

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

где обозначения те же, что и для формулы (5). 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

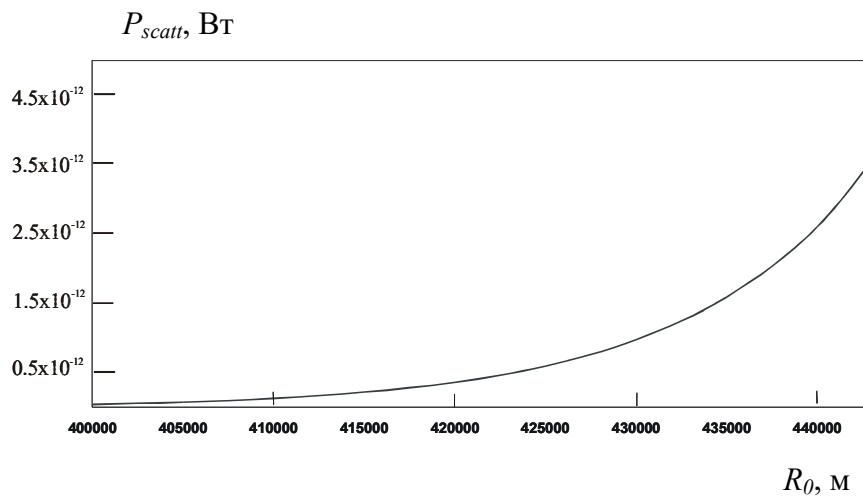


Рис.5. Зависимость мощности, попадающей в приемный объектив лидара, от расстояния зондирования для слоя рассеяния 5000 метров

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. 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 желательнее оценивать с точностью до ~1000 метров. 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 [8], 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 вводится 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 метров и этого достаточно для уточнения профиля концентрации метана на протяжении всей трассы также с разрешением ~1000 метров.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Литература

1. Shindel D.T., Faluvegi G.S., Koch D.M., et al. Improved attribution of climate forcing to emissions // *Science*. 2009. V 326. P. 716–718.
2. Nisbet G.N., Dlugokencky E.J., Bousquet P.E. Methane on the rise—Again // *Science*. 2014. V343. P. 493–495.
3. Weidmann D., Hoffmann A., Macleod N., et al. The Methane Isotopologues by Solar Occultation (MISO) Nanosatellite Mission: Spectral Channel Optimization and Early Performance Analysis // *Remote Sens*. 2017. V 9. №1073. P1-20.
4. Akimova G. A., Grigorievskii V. I., Mataibaev V. V., et al. Enhancement of the Energy Potential of a Lidar for Methane Detection with the Use of a Quasi_Continuous Radiation Source // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015. V. 60. №10. P. 1058–1061.
5. Бажин Н.М. Метан в окружающей среде. Новосибирск: РАН. 2010.
6. Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей, курс лекций. Екатеринбург: изд. Уральского университета. 2008.
7. Новикова В.А., Варжель С.В. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет. 2019.