

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.10>

УДК: 621.396.029.7

ИЗМЕРЕНИЯ ФОНОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА ДИСТАНЦИОННЫМ ЛИДАРОМ НА КИЛОМЕТРОВЫХ ТРАССАХ В РАЙОНЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В. И. Григорьевский, В. П. Садовников, А. В. Элбакидзе

**Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141190, г. Фрязино, пл. ак. Введенского, д.1**

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2021 г.

Аннотация. Проведены локальные трассовые измерения фоновой концентрации метана на территории северо-востока Московской области дистанционным активным лидаром на основе мощного рамановского усилителя оптического излучения в диапазоне длин волн ~ 1650 нм. Мощность излучения в импульсе составляла около 3 Вт. Трассы выбирались с возможными аномальными отклонениями в фоне атмосферного метана и включали лесные массивы, застройку домами с газифицированным подводом природного газа, торфяное озеро, автодорогу с интенсивным движением, животноводческую ферму, полигон твердых бытовых отходов. Протяженность трасс составляла от ~ 0.6 км до ~ 3.15 км. Наибольшая фоновая концентрация метана наблюдалась над животноводческой фермой и над трассой с полигоном твердых бытовых отходов, что подтверждает факт повышенного выделения газа над этими объектами. Над трассой с газифицированными домами и автодорогой с интенсивным движением наблюдался также повышенный фон содержания метана, что свидетельствует о возможном увеличении количества автомобилей, использующих метан в качестве топлива и возможной утечке природного газа из трубопроводов, обеспечивающих дома природным газом.

Ключевые слова: активный лидар, метан, концентрация, атмосфера, парниковые газы.

Abstract. Local path measurements of the background methane concentration in the northeast of the Moscow Region were carried out using a remote active lidar based on a powerful Raman amplifier of optical radiation in the wavelength range of ~ 1650 nm. The radiation power in the pulse was about 3 W. The trasses were selected taking into account possible anomalous deviations of the background of atmospheric methane and included forests, gasified buildings with natural gas, a peat lake, a road with heavy traffic, a livestock farm and a solid waste landfill. The length of the distances ranged from ~ 0.6 km to ~ 3.15 km. The highest background concentration of methane was observed over a livestock farm, over a highway and a solid waste landfill, which confirms the fact of an increase in gas emissions over these facilities. Also, higher methane levels were observed above of the gasified homes and the heavy traffic road, indicating a possible increase in the number of vehicles using methane as fuel and a possible leak of natural gas from pipelines supplying buildings with natural gas.

Key words: active lidar, methane, concentration, atmosphere, greenhouse gases.

Введение.

В настоящее время для прогнозирования климатических изменений на Земле большое значение приобретает мониторинг парниковых газов, таких как метан, углекислый и другие атмосферные газы. Для глобального контроля фоновой концентрации метана особенно хорошо подходят спутниковые методы мониторинга. В работе [1] проведено сопоставления концентраций фона метана, измеренных различными миссиями, как спутниковыми (Envisat, GOSAT, IASI, самолетными (HIPPO), так и наземными (TCCON) с помощью пассивных лидаров, использующих различные методы измерений. Для измерений в проектах Envisat и GOSAT в качестве зондирующего излучения для спектральных измерений использовался солнечный свет, поэтому представлены только дневные наблюдения. В миссии IASI использовался метод температурного контраста между атмосферой и поверхностью Земли, поэтому

данные представлены как по дневным, так и по ночным измерениям за период 2007-2015 годов. Горизонтальное разрешение по поверхности фоновой концентрации указанными миссиями невелико (сотни километров), однако измерения охватывают почти всю поверхность Земли, включая полярные районы. Обращает на себя внимание, что в эти годы в различных районах Земного шара по приводимым в работе данным фон метана не превышал ~ 1.82 ppm в глобальном масштабе.

Улучшить горизонтальное разрешение по поверхности возможно с помощью активных спутниковых лидаров. Так 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 Германского центра космических и воздушных полетов (DLR), планируют осуществить в 2021 году [2]. В данном проекте рассматривается возможность измерения интегральной концентрации метана в столбе атмосферы с точностью в единицы процентов с помощью активного лидара с передатчиком, выполненным на параметрическом генераторе света на длине волны ~ 1645 нм. Активные методы измерений основаны на дифференциальном поглощении оптического излучения в линии и вне линии поглощения метана. Однако, разрешающая способность таких спутниковых измерений также пока невысока. При типичном усреднении измерений в $\sim 5-10$ секунд при средней скорости движения спутника по орбите ~ 7.8 км/с, разрешение по горизонтальной координате составит 39-78 км, что является в некоторых случаях недостаточным для определения, например локальных выбросов метана из природных или антропогенных источников метана. Для таких целей подходят методы наземного контроля, например из передвижной лаборатории, оснащенной необходимой аппаратурой для контроля метана или природного газа. Передвижная лаборатория может быть оперативно перемещена в тот или иной район, где необходимо измерить концентрацию газа, к тому же в отличие от вертолетных измерений, измерения наземным

транспортом гораздо дешевле и, возможно, точнее. Удобная привязка к местности по карте района пункта наблюдения позволяет регулярно проводить измерения в долгосрочной перспективе. Достаточно отметить на карте мобильного телефона точку приемопередатчика, в которую оперативно можно выехать для повторения замеров в любой момент времени.

Целью настоящей работы является определение фоновой концентрации метана и природного газа над наиболее “интересными” объектами с точки зрения возможных экологических аномалий с высотой трассы $\sim 5-20$ метров над поверхностью Земли дистанционным лидарным методом в инфракрасном диапазоне длин волн ~ 1650 нм с помощью передвижной автомобильной лаборатории и сопоставление полученных данных с другими источниками измерений.

1. Аппаратура и методика измерений.

В качестве датчика метана использовался макет лидара, блок-схема которого приведена на рис. 1. Использовался передатчик с лчм модуляцией задающего лазера с последующим усилением в мощном волоконном рамановском усилителе.

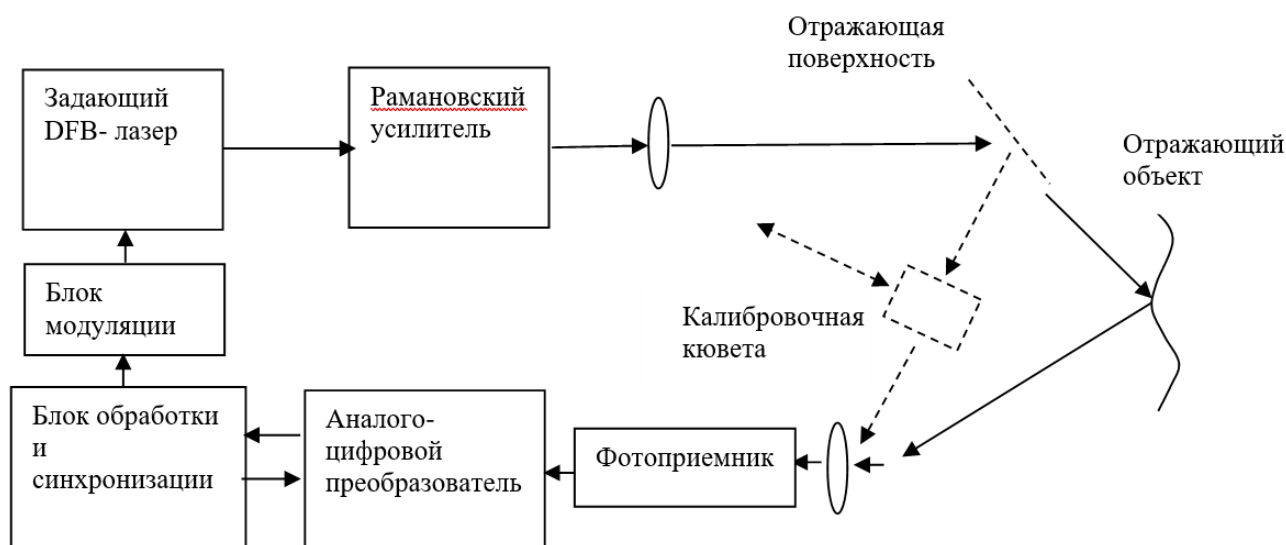


Рис. 1. Блок-схема активного лидара.

На выходе коллиматора передатчика мощность в импульсе составляла около 3 Вт на длине волны ~ 1653 нм. Блок модуляции осуществлял линейно-частотную модуляцию задающего лазера по синхронизирующим импульсам, поступающим с блока обработки и синхронизации. Сигнал с фотоприемника оцифровывался аналого-цифровым преобразователем и поступал в блок обработки. Достоинствами рассмотренной схемы является возможность определения наряду с осажденным слоем метана на измеряемой трассе и расстояния до точки отражения по заднему фронту квазиимпульса модуляции или по корреляционной функции. Такое измерение расстояния позволяет пересчитать величину осажденного слоя метана на всей трассе в объемную концентрацию по формуле, вытекающей из закона Бугера [3]:

$$C = \ln(I_0 / I) / \alpha L, \quad (1)$$

где I – интенсивность прошедшего на фотоприемник света в линии поглощения газа, I_0 – интенсивность прошедшего на фотоприемник света вне линии поглощения газа; α – коэффициент поглощения газа, C – концентрация метана в ppm (частей на миллион), L – длина атмосферной трассы. Коэффициент поглощения α (форма линии), в свою очередь, может быть аппроксимирован контуром Лоренца:

$$\alpha(\nu) = N_0 \sigma(\nu) = N_0 \sigma(\nu_0) / (1 + \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\gamma^2}), \quad (2)$$

где N_0 – количество молекул в единице объема, ($N_0 = 2,6875 \times 10^{25}$ 1/м³ – число Лошмидта), $\sigma(\nu)$ – поперечное сечение поглощения, $\nu = 2\pi / \lambda$ – волновое число (λ – длина волны излучения), ν_0 – волновое число в максимуме линии поглощения, γ – полуширина линии поглощения на полувысоте ее амплитуды. Согласно базе HITRAN ширина линии поглощения метана на длине волны 1653.73 нм, на которой проводились измерения составляет ~ 0.0618 нм, а сечение поглощения на этой длине волны – $\sigma(\nu_0) \sim 10^{-20}$ см². Лидар измеряет L и величину I / I_0 в диапазоне полосы регистрации ~ 0.5 нм, оцифровывая принятые сигналы с тактовой частотой около 1 МГц. При длине измеряемых трасс $\sim 0.6 - 3.15$ км

разрешение по горизонтали определяется примерно такими же значениями расстояния.

При проведении работ по определению фоновой концентрации осуществлялись также калибровочные измерения, когда излучение после передающего коллиматора с помощью близкорасположенной отражающей поверхности через калибровочную кювету и мимо нее направлялось непосредственно в приемный объектив лидара, минуя трассу. Пример получаемых осциллограмм сигналов с фотоприемника показан на рис. 2. Величины I_0 , I , указанные в (1), соответствуют напряжениям, отсчитываемым соответственно от точек А и В до нулевого уровня (0).

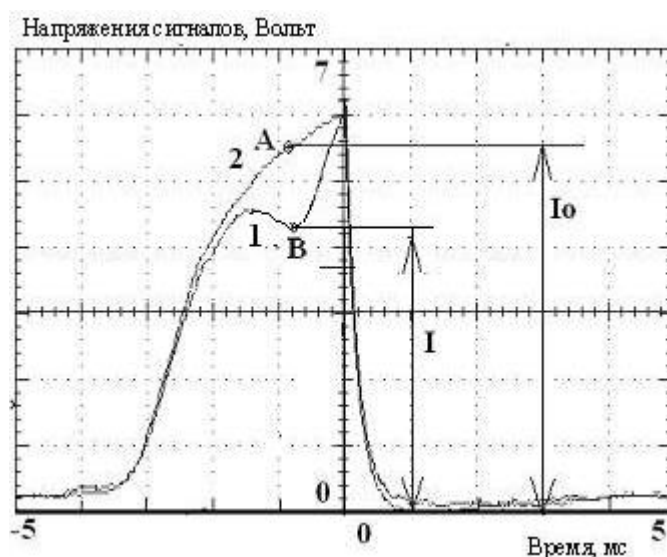


Рис. 2. Пример осциллограммы сигналов после фотоприемника. Кривая 1 – сигнал при отражении светового излучения от объекта (деревьев), расположенных на расстоянии 2.25 км, 2 – сигнал при отражении светового излучения от близкорасположенной (~ 0.5 м) мишени.

2. Результаты натурных измерений.

Измерения проводились при сравнительно теплой погоде, летом 2021 года. В качестве примера трасса 2.25 км (рис. 3) проходила частично над лесными массивами, частично над оживленной магистральной автомобильной трассой, которая соединяет городские поселения и расположена между лесными массивами.

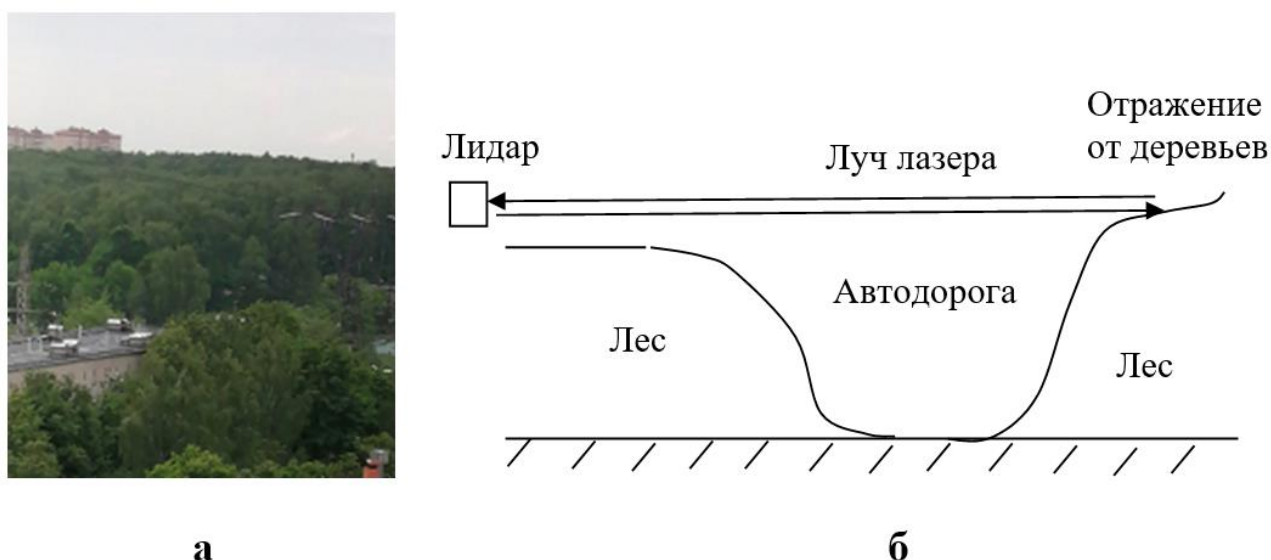


Рис. 3. а) фотография трассы 2.25 км, б) профиль подстилающего ландшафта

Результаты измерений фоновой концентрации метана на данной трассе составили 1.84 ppm. В таблице 1 приведены результаты и условия измерений на всех измеренных трассах.

Таблица 1. Результаты измерений фоновой концентрации метана на трассах.

Длина трассы, м	Концентрация фона метана, ppm	Метеоусловия	Описание трассы	№ трассы
2250	1.84	23 град, солнечно	Над лесными массивами и магистральной автодорогой с интенсивным движением	1
1650	1.97	23 град, солнечно	Над низинным и заболоченным лесным массивом, газифицированными 5-этажными домами и магистральной дорогой с интенсивным автодвижением	2
1500	1.69	20 град, солнечно	Над частными газифицированными домами, торфяным озером и местными автодорогами	3
600	1.74	20 град, солнечно	Над частными газифицированными домами и небольшими местными автодорогами	4

1100	2.05	27 град, солнечно	Над животноводческой фермой крупного рогатого скота	5
750	1.8	23 град, солнечно	Над частными газифицированными домами, небольшими местными автодорогами и котельной	6
3150	2.1	25 град, солнечно и в сумерки	Над частными газифицированными домами, магистральной автодорогой и полигоном твердых бытовых отходов	7

Все измерения осуществлялись, в основном, в ясную солнечную погоду с небольшой разницей в температуре окружающего воздуха и при слабом ветре. Точность измерения расстояний до области отражения составляла $\delta L \sim 50$ метров, а точность измерения уровня интенсивности света $\delta I / I \sim 3\%$. Из формулы (1) нетрудно получить общую погрешность измерения объемной концентрации фона метана $\delta C / C$:

$$\delta C / C = \sqrt{(\delta I / I)^2 + (\delta L / L)^2} \approx 6\% , \quad (3)$$

при измеряемом расстоянии $L \sim 1000$ метров. Из таблицы видно, что наибольшая концентрация фона метана наблюдалась на трассе с частными газифицированными домами, магистральной автодорогой и полигоном твердых бытовых отходов (№7). Следующей идет трасса над животноводческой фермой крупного рогатого скота (№5). На третьем месте по концентрации фона метана находится трасса с низинным и заболоченным лесным массивом, газифицированными 5-этажными домами и дорогой с интенсивным автодвижением (№2), а на четвертом – трасса над лесными массивами и магистральной автодорогой с интенсивным движением (№1). Лесное торфяное озеро с достаточно чистой водой, которое является продолжением трассы с одноэтажной застройкой №3, как оказалось, выделяет достаточно мало метана и по концентрации фона находится на последнем месте из всех представленных трасс. Данное озеро обладает чистой песчаной береговой линией и на нем не

наблюдается каких-либо процессов заболачивания или загнивания, а поблизости расположен детский оздоровительный лагерь. Небольшая фоновая концентрация над озером согласуется с тем фактом, что над сушей выделение метана сильнее, чем над чистой водой [4].

Исследования подтвердили научные данные о наибольшем выделении метана с таких объектов как животноводческие фермы, полигоны твердых бытовых отходов и болотистые местности [4]. Достаточно высокая концентрация фона метана на трассе №1 связана, на наш взгляд, с начавшимся переходом автомобильного транспорта на заправку метаном, вместо пропана [5-7]. На трассе №2 к этому добавился низинный лесной массив с заболоченной почвой. При измерениях на трассе №7 наблюдался интересный эффект, когда в сумерках и в ночное время концентрация фона метана увеличивалась на ~ 10-15% по сравнению с дневными измерениями. Такое повышение фоновой концентрации, возможно связано с меньшим количеством радикалов ОН в условиях уменьшения температуры окружающей среды, ее освещенности и уменьшение, за счет этого, естественных стоков метана [4].

Приведенные данные можно сопоставить с измерениями, выполненными в других работах. Например, в работе [7] был определен средний фон метана ~ 2.085 ppm на трассах длиной ~ 800 метров. Измерения проводились в районе г.Томска в феврале 2019 года. К сожалению, в работе не было указано каких-либо особенностей подстилающей поверхности трассы. Для измерения использовался активный лидар с излучателем на основе параметрического генератора света на длинах волн в районе 3.3 мкм.

В 2007-2015 годах измерения метана проводились различными спутниковыми миссиями, такими как IASI, GOSAT, самолетными HIPPO, так и наземными TCCON, систематизированные в работе [1] и проведено сопоставления концентрации фона метана, измеренные данными миссиями, с достаточно грубым разрешением (сотни километров) по всей поверхности Земли. Обращает на себя внимание, что в те годы в различных районах Земного шара фон метана не превышал ~ 1.82 ppm на обмерянных участках поверхности

Земли. В районах Европейской части России и в районе Томска данный показатель составлял $\sim 1.76 - 1.8$ ppb. Если учесть, что в последующие годы рост фона метана составлял ~ 6 ppb в год [4] то за время ~ 10 лет фоновая концентрация метана в данных районах могла увеличиться на ~ 60 ppb = 0.06 ppb и составить величину $\sim 1.88 - 1.9$ ppb, что близко к результатам, полученным как в работе [7] так и в настоящей работе. С учетом локальных особенностей трасс, приведенных выше, можно сказать, что результаты хорошо вписываются в глобальный фон метана вблизи поверхности Земли, измеренный различными миссиями. Однако, некоторые особенности фоновых измерений метана, приводимых в [1] показывает, что в ночные часы концентрация фона уменьшается по сравнению с дневными измерениями, что отличается от данных наших измерений, а также измерений, проводимых в районе г. Обнинска (юго-западное направление от Москвы) [8], где в моменты температурной инверсии (снижении температуры в приповерхностной атмосфере) концентрация фона метана увеличивается. Возможно, в этих случаях сказывается специфический эффект закономерный только для пассивных методов измерений, когда непосредственно солнечное излучение является информативным световым сигналом. С этим вопросом необходимо разбираться особенно тщательно, тем более что в той же работе [1], например для Европейской части приведены графики фоновой концентрации метана для зимне-осенних и весенне-летних месяцев, где в зимне-осенние месяцы (при похолодании) фон метана заметно выше и это подтверждается данными, полученными различными спутниковыми миссиями, описанными в статье.

Для уточнения данных по фоновой концентрации метана на измеренных трассах нами планируются измерения в различное время года, в разное время суток, которые помогут прояснить динамику изменения фона метана на протяжении различных временных отрезков с достаточно хорошим пространственным разрешением.

Заключение.

Проведены измерения фоновой концентрации метана на северо-востоке Московской области на различных трассах длиной от 0.6 до 3.15 км. Трассы выбирались с возможной аномальностью содержания фона метана: болотистые почвы, животноводческая ферма, полигон твердых бытовых отходов и т.д. Показано, что для примерно одинаковых метеоусловий концентрации фона метана могут значительно различаться. Если для трассы с полигоном твердых бытовых отходов значения составляют ~ 2.1 ppm, то для одноэтажной застройки с расположенным вблизи торфяным озером это значение составило 1,69 ppm. В темное время суток с понижением температуры воздуха фоновая концентрация на трассе с полигоном возрастала на 10-15%. Данные сопоставлены с работами других авторов, которые подтверждают постепенное увеличение метана в воздухе в последнее десятилетие и повышенные выбросы газа в экологически аномальных зонах.

Финансирование.

Работа выполнена в рамках Государственного задания.

Литература

1. Siddans R., Knappett D., Waterfall A. et al. Global height-resolved methane retrievals from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) on MetOp. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016. V.290. №11. P.1-46. <http://doi.org/10.5194/amt-2016-290>
2. 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 Sensing*. 2017. V.9. №10. P.1073. <http://doi.org/10.3390/rs9101073>

3. Grigorievsky V.I., Tezadov Y.A. Modeling and Experimental Study of Lidar Resolution to Determine Methane Concentration in the Earth's Atmosphere. *Cosmic Research*. 2020. V.58. №5. P.330-337. <https://doi.org/10.1134/s0010952520050020>
4. Бажин Н.М. *Метан в окружающей среде*. Новосибирск, РАН. 2010. 56 с.
5. Гид по метану. Brc Gas Equipment. Газовые установки для транспортных средств. *Мир газа*. https://www.mirgaza.ru/Docs/BRC_Main/BRC-RUS_metan_guide.pdf
6. В чем преимущества Метана, как вида топлива. *Яндекс.Дзен*. <https://zen.yandex.ru/media/id/5cb8cf4951095b00b39e3820/v-chem-preimuscestva-metana-kak-vida-topлива-5cc603fe13574e00b23c4d48>
7. Yakovlev S., Sadovnikov S., Kharchenko O. et al. Remote Sensing of Atmospheric Methane with IR OPO Lidar System. *Atmosphere*. 2020. V.11. №70. P.1-13. <http://doi.org/10.3390/atmos11010070>
8. Арефьев В.Н., Акименко Р.М., Упэнэк Л.Б. Фоновая составляющая концентрации метана в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск»). *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т.52. №1. С.42-50. <https://doi.org/10.7868/S0002351515060036>

Для цитирования:

Григорьевский В.И., Садовников В.П., Элбакидзе А.В. Измерения фоновой концентрации метана дистанционным лидаром на километровых трассах в районе Московской области. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.10>