

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.3>

УДК: 621.396.029.7

## ЛИДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ФОНОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

В.И. Григорьевский, Д.М. Каленов, В.П. Садовников, Я.А. Тезадов, А.В. Элбакидзе

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал  
141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 10 августа 2023 г.

**Аннотация.** Проведены дневные, сезонные и годовые измерения вариаций фона метана на территории северо-востока Московской области как активным дистанционным лидаром, работающим на длине волны  $\sim 1650$  нм с мощным источником излучения на основе рамановского усилителя, так и пассивным методом, используя солнечное излучение в качестве широкополосного источника света. Наблюдения велись как в урбанизированной местности вблизи города, так и в экологически чистом районе с низким хозяйственным уровнем деятельности. За 4 года наблюдений фоновая концентрация метана в урбанизированной местности выросла с  $\sim 2.0$  ppm до  $\sim 2.24$  ppm, в экологически чистой местности с 1.75 ppm до 1.95 ppm. Особенно сильный скачок произошел в последний год наблюдений на  $\sim 0.15-0.2$  ppm. Методику и результаты измерений возможно использовать для экологического мониторинга объектов и прогнозирования динамики фона метана.

**Ключевые слова:** лидар, атмосфера, концентрация, метан, разрешающая способность, мониторинг.

**Финансирование:** Работа выполнена по Госзаданию № 075-01110-23-01.

**Автор для переписки:** Григорьевский Владимир Иванович, [vig248@rambler.ru](mailto:vig248@rambler.ru)

## Введение

В настоящее время для прогнозирования климатических изменений на Земле большое значение приобретает мониторинг парниковых газов, таких как метан, углекислый газ, пары воды и другие атмосферные газы. Для глобального контроля фоновой концентрации метана особенно хорошо подходят спутниковые методы мониторинга. В работе [1-2] 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 фон метана не превышал  $\sim 1.82$  ppm в глобальном масштабе по приводимым в работе данным. 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 2027 году [3]. 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  $\sim 1645$  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  $\sim 7.8$  км/с, разрешение по горизонтальной координате составит  $\sim 40-80$  км, что является в некоторых случаях недостаточным для определения, например локальных выбросов метана из природных или антропогенных источников метана. В последнее время было сообщено, что канадский спутник “Хьюго” [4] обнаружил большой выброс метана на шахте “Распадская” в России и шлейфы этого выброса, как сообщается, возможно, были выпущены намеренно, в качестве меры безопасности, поскольку газ может просачиваться из шахт и воспламеняться с потенциально смертельными исходами. Для целей обнаружения локальных выбросов метана, на наш взгляд, также 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.

Измерения метана возможно проводить и пассивным методом, используя солнечное излучение как широкополосный источник света и проводить измерения на отдельных линиях поглощения метана, например, на линиях R3 и R5 [5]. Такой метод позволяет измерять концентрацию метана в приземном слое атмосферы с пространственным разрешением в десятки километров. В ИРЭ РАН, начиная с 2018 года, велись систематические измерения фона метана в

районе северо-востока Московской области как с помощью активного газоанализатора на основе перестраиваемого по длине волны узкополосного DFB лазера и мощного рамановского усилителя, так и пассивным методом,

Целью настоящей работы являются сезонные измерения фоновой концентрации метана в течение зимне-летнего периода, систематизация полученных данных фоновой концентрации метана на протяжении последних лет, выявление тенденций ее изменений и возможный прогноз на будущее поведения фона метана на северо-восточной окраине г. Москвы.

## 1. Аппаратура и методика измерений.

В качестве активного датчика метана использовался макет лидара, блок-схема которого приведена на рис.1. Использовался передатчик с ЛЧМ модуляцией задающего DFB лазера (distributed feedback, лазер с распределенной обратной связью) с последующим усилением в мощном волоконном рамановском усилителе. На выходе коллиматора передатчика мощность в импульсе составляла около 3 Вт на длине волны  $\sim 1653$  нм.

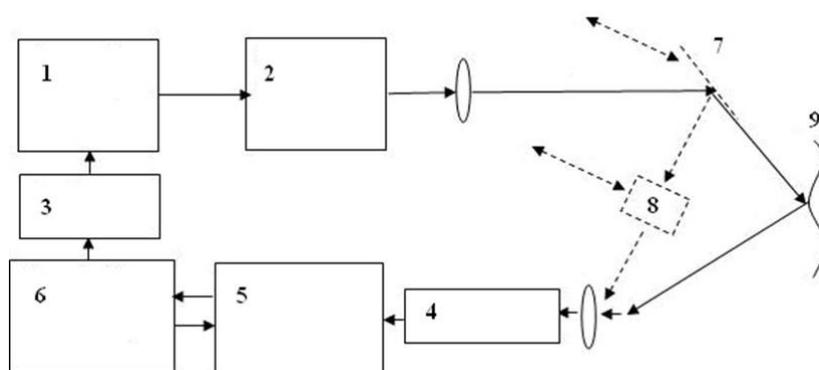


Рис. 1. Блок – схема активного лидара. 1- задающий DFB лазер, 2 – рамановский усилитель, 3 – блок модуляции, 4 – фотоприемник, 5 – аналого-цифровой преобразователь, 6 – блок обработки и синхронизации, 7 – отражающая плоскость, калибровочная кювета с метаном, 9 – отражающий объект.

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. Такое измерение расстояния позволяет пересчитать величину осажденного слоя метана на всей трассе в объемную концентрацию по формуле, вытекающей из закона Бугера [6]:

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

где  $I$  – интенсивность прошедшего на фотоприемник света в линии поглощения газа,  $I_0$  – интенсивность излученного света вне линии поглощения;  $\alpha$  – коэффициент поглощения газа,  $C$  – концентрация метана в ppm (частей на миллион),  $L$  – длина атмосферной трассы. Коэффициент поглощения  $\alpha$  (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/м<sup>3</sup> – число Лошмидта),  $\sigma(\nu)$  – поперечное сечение поглощения,  $\nu = 2\pi / \lambda$  – волновое число ( $\lambda$  – длина волны излучения),  $\nu_0$  – волновое число в максимуме линии поглощения,  $\gamma$  – 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  $\sim 0.0618$  нм, а сечение поглощения на этой длине волны –  $\sigma(\nu_0) \sim 10^{-20}$  см<sup>2</sup>. Лидар измеряет  $L$  и величину в диапазоне полосы регистрации  $\sim 0.5$  нм, оцифровывая принятые сигналы с тактовой частотой около 1 МГц. 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  $I_0$  и  $I$ , указанные в формуле (1), соответствуют напряжениям, отсчитываемым соответственно от точек А и В до нулевого уровня (0).

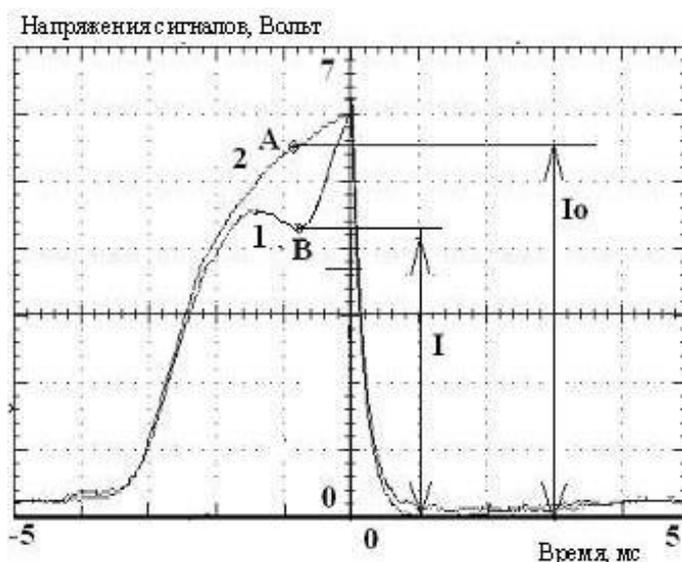


Рис. 2. Пример оциллограммы сигналов после фотоприемника. Кривая 1 – форма сигнала при отражении светового излучения от объекта (деревьев), расположенных на расстоянии 2.25 км, 2 – форма сигнала при отражении светового излучения от близкорасположенной (~0.5 м) плоскости.

В качестве пассивного лидара использовался макет, показанный на рис. 3. Измерителем спектрального состава прошедшего сквозь атмосферу солнечного света 4, рис. 3 служил оптический анализатор спектра 1, волоконный коллиматор 2 с диаметром входного зрачка ~ 1 см принимал свет и с помощью волоконного кабеля 3 направлял излучение на входной разъем анализатора спектра. Система наведения состояла из опорно-поворотного устройства 5 по азимуту и углу места с точностью отсчета угла не хуже 0.5 град. Измеряемые в устройстве углы по шкале прибора проверялись по калькулятору высоты Солнца по местному времени и местоположению [7]. Расхождение составило не более 0.3 град во всем диапазоне углов сканирования.

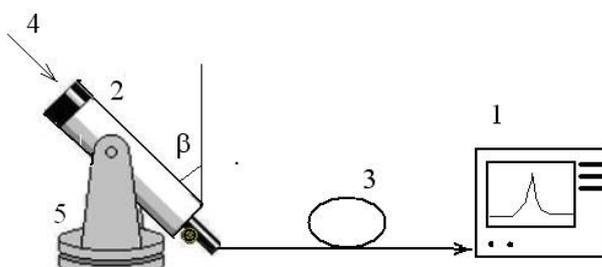


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки измерения метана пассивным, спектральным методом

### 3. Результаты измерений

Измерения велись на трассе длиной 2.25 км в течение зимы-лета 2023 года. Разрешение по горизонтали определяется примерно такой же величиной расстояния. Эта трасса была измерена и в 2021 году и отличалась повышенным содержанием метана 2.0 ppm. Она проходила частично над низинным и заболоченным лесным массивом, частично над газифицированными 5-этажными домами и магистральной автодорогой с интенсивным движением. Результаты измерений представлены на рис. 4.

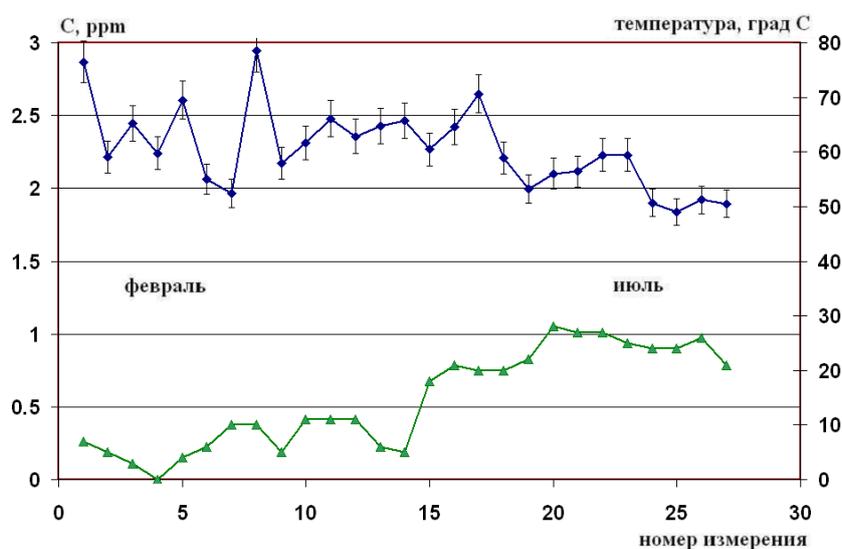


Рис. 4. График измерений фона метана в зимне-летний период 2023 г. Верхняя кривая – концентрация (левая шкала), нижняя кривая – температура воздуха (правая шкала).

Средняя концентрация за весь период наблюдений составила 2.23 ppm, причем возможной корреляции с погодными условиями не наблюдалось. Небольшая корреляция была с направлением скорости ветра и температурой воздуха на трассе измерений. Большие выбросы концентрации, возможно, связаны с переносом метана от г. Щелково и подземного газохранилища при направлениях ветра от южного до юго-западного. На трассе длиной 2.25 км был проведен суточный сеанс измерений с помощью активного лидара. Результаты представлены на рис. 5.

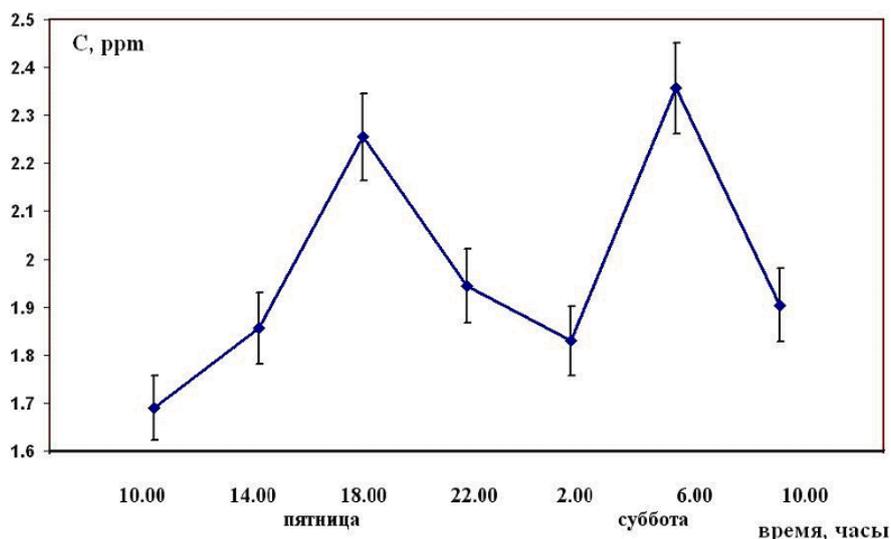


Рис. 5. Измерения концентрации метана на трассе 2.25 км в течение суток.

Из рисунка видно, что есть корреляция со временем суток, когда в ночные часы от 22.00 до 2.00 концентрация падала. Увеличение ее в 6.00, возможно, связано с заметным повышением хозяйственно-экономической деятельности человека в утренние часы, то есть с антропогенным фактором. Вторая особенность точки 6.00 – это резкая смена направления скорости ветра с северо-западного на северный и пик в этой точке, возможно, объясняется локальным выбросом метана в северном направлении от трассы. Основываясь на представленных данных, можно отметить, что мониторинг метана на протяжении длительного времени желательно осуществлять в одни и те же часы для исключения суточных вариаций, обусловленным антропогенным фактором, поскольку эти вариации достаточно велики.

Также был проведен анализ фоновой концентрации метана по годам, начиная с 2018 года как на «загрязненных» метаном трассах, так и на экологически чистых. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Таблица 1 Данные фона метана для урбанизированной и экологически «чистой» местности

Год	Урбанизированная местность	Экологически «чистая» местность
	Концентрация фона метана, ppm	Концентрация фона метана, ppm
2018	2.10	1.75
2021	2.10	1.75
2022	2.05	1.91
2023	2.2	1.9

Погрешности измерений составляли примерно 5%. Из таблицы видно, что в последние годы наблюдается тенденция накопления метана в нижнем слое тропосферы. Это может быть связано, в том числе, с утечками метана из газотранспортных систем, все большем использовании двигателей, использующих метан в качестве топлива, уменьшение площади лесных массивов.

## **Заключение**

Таким образом, проведены суточные, сезонные и годовые измерения фоновой концентрации метана в районе северо-востока Московской области с помощью активного и пассивного лидара в диапазонах длина волн  $\sim 1648$  и  $\sim 1653$  нм. По измерениям за 4 года можно сделать вывод, что метан в последние годы накапливается в приземном слое атмосферы со скоростью порядка 0.1 ppm в год в урбанизированной местности вблизи северо-восточной окраины г. Москвы. Фоновая концентрация в экологически чистой местности, расположенной далее от города меньше и пока практически стабильна на уровне 1.90 ppm. Поведение фона метана коррелирует с сезонным изменением температуры, и это связано, в том числе, с увеличением стоков метана при повышении температуры за счет увеличения ионов ОН в воздухе, с которыми взаимодействуют молекулы метана. Поскольку фон увеличивается быстрее вблизи мегаполисов, то это, на наш взгляд, связано с хозяйственной деятельностью человека, возможными выбросами метана из трубопроводов, хранилищ, метановых двигателей автомобилей, которых в последние годы становится все больше. Немаловажным фактором такого процесса является и сокращение лесных массивов, которые способны поглощать углеводороды.

**Финансирование:** Работа выполнена по Госзаданию № 075-01110-23-01.

## Литература

1. Siddans R., Knappett D., Waterfall A. et al. Global height-resolved methane retrievals from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) on MetOp. // *Atmos. Meas. Tech.* – 2016. – Vol. 290. – №11. – P.1-46.  
<https://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 Sens.* – 2017. Vol. 9. – №1073. P.1-20.  
<https://doi.org/10.3390/rs9101073>
3. MERLIN (Methane Remote Sensing Lidar Mission). Электронный ресурс:  
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/merlin>
4. Canadian satellite detects huge burst of methane from Russian coal mine. Электронный ресурс: <https://www.cbc.ca/news/science/russia-methane-leak-1.6489675>
5. Григорьевский В.И., Тезадов Я.А. Компенсация систематической погрешности спектральных измерений фоновой концентрации метана в атмосфере Земли // *Измерительная Техника.* – 2023. – №4 – С. 44-49.  
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2023-4-44-49>
6. 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. – Vol. 58. – №. 5. P. 330–337.  
<https://doi.org/10.1134/S0010952520050020>
7. Азимут и высота солнца над горизонтом. Электронный ресурс:  
<https://planetcalc.ru/320/>

### Для цитирования:

Григорьевский В.И., Каленов Д.М., Садовников В.П., Тезадов Я.А., Элбакидзе А.В. Измерение дневных, сезонных и годовых вариаций фона метана оптическим лидаром на северо-востоке Московской области. // *Журнал радиоэлектроники.* – 2023. – №. 11.  
<https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.3>