

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.1>

УДК: 621.396.029.7

ТОМОГРАФИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА НА ПРИЗЕМНЫХ ТРАССАХ

В.И. Григорьевский, Я.А. Тезадов

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

Статья поступила в редакцию 7 июня 2024 г.

Аннотация. С помощью созданного макета дистанционного лидара для измерения концентрации метана проведено исследование распределения метана вдоль трассы длиной ~ 2.25 км с целью локализации выбросов газа и контроля утечек в неблагоприятных зонах. Макет лидара, работающий на длине волны 1653 нм, включал в себя мощный рамановский усилитель и позволял измерять расстояние до точки отражения с точностью не хуже 50 метров. Лидар сканировал трассу, начиная с коротких дистанций и заканчивая измерения на всей измеряемой трассе. Трасса включала в себя ближнюю зону с современной многоэтажной застройкой без газовой инфраструктуры, среднюю зону с многоэтажной застройкой и газовой инфраструктурой, а также протяженный лесной массив, заканчивающийся оживленной трассой с интенсивным автомобильным движением. То есть, была возможность оценки вклада каждой зоны на фоновую концентрацию метана по трассе. Наблюдения велись в течение зимнее-весеннего периода и проводились в различное время суток при погодных условиях, которые фиксировались. Обработка результатов показала существенно-различный вклад каждой из зон в среднюю концентрацию на трассе. Особенно большим оказался вклад средней зоны с многоэтажной

застройкой, оборудованной газовой инфраструктурой, что позволяет говорить о возможной утечке газа из газораспределительной системы в данном районе. В среднем концентрация фона метана на данной трассе повторила величину, измеренную в 2023 году в такой же сезонный период 2023 года.

Ключевые слова: томографический метод, лидар, атмосфера, концентрация, метан, разрешающая способность, утечки газа.

Финансирование: работа выполнена по Госзаданию ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автор для переписки: Григорьевский Владимир Иванович, 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 работах [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 ~ 1.82 ppm в глобальном масштабе по приводимым в работе данным. Улучшить

разрешающую способность лидарных технологий возможно с помощью активных лидаров. Такие технологии, как для спутниковых, так и для наземных измерений готовятся и проводятся в некоторых странах [3-5]. Активные методы измерений основаны, в основном, на дифференциальном поглощении оптического излучения в линии и вне линии поглощения метана. 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. К тому же, если дистанционный лидар позволяет измерить расстояние до точки отражения оптического сигнала, то появляется возможность томографического контроля загрязнения местности газом в радиусе его действия. Разрешающая способность такого метода будет определяться точностью измерений как расстояния до точки отражения, так и концентрации исследуемого газа.

Целью настоящей работы являлось определение распределения концентрации метана вдоль конкретной трассы, включающей в себя как урбанизированную местность с жилой застройкой, так и экологически чистую местность с протяженным лесным массивом, и выявление возможных отклонений от естественного фона метана на данной трассе.

1. Аппаратура и методика измерений.

В качестве активного датчика метана использовался макет лидара, блок-схема которого приведена на рис.1. Использовался передатчик с линейно-частотной 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 ~ 1653 нм.

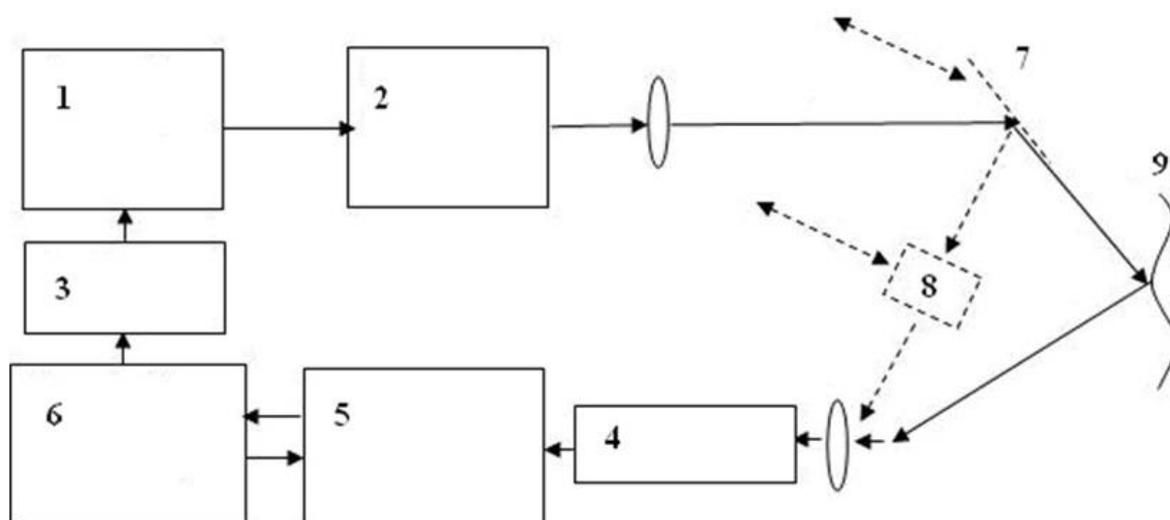


Рис. 1. Блок – схема активного лидара. 1 – задающий DFB лазер, 2 – рамановский усилитель, 3 – блок модуляции, 4 – фотоприемник, 5 – аналого-цифровой преобразователь, 6 – блок обработки и синхронизации, 7 – отражающая плоскость, 8 – калибровочная кювета с метаном, 9 – отражающий объект.

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]:

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

где I – интенсивность прошедшего на фотоприемник света в линии поглощения газа, I_0 – интенсивность излученного света вне линии поглощения; 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:

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

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 величины I и I_0 в диапазоне полосы регистрации ~ 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 сигналов с фотоприемника показан на рис. 2. Значения I_0 и I , указанные в формуле (1), соответствуют величинам, отсчитываемым соответственно от точек А и В до нулевого уровня (0).

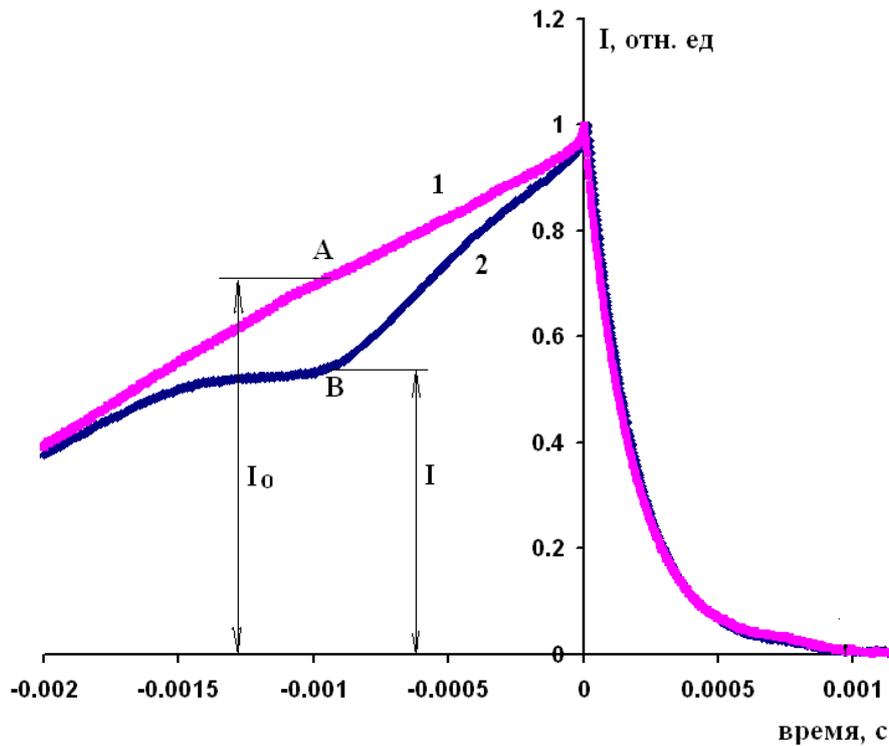


Рис. 2. Пример получаемых сигналов после фотоприемника. Кривая 1 – форма сигнала при отражении светового излучения от близкорасположенной (~0.5 м) плоскости, 2 – форма сигнала при отражении светового излучения от объекта (деревьев), расположенных на расстоянии 2.25 км.

Трасса измерений проходила на высоте ~ 15 метров от уровня земной поверхности, ее топографический профиль представлен на рис. 3.



Рис. 3. Карта местности под трассой измерений.

Начальный участок трассы (зона 1) проходил в зоне с современной многоэтажной застройкой без использования какого-либо газового оборудования, далее была зона 2 с многоэтажной застройкой с газовым отоплением домов и соответствующей газовой инфраструктурой, а за ней находился протяженный лесной массив (зона 3), заканчивающийся автодорогой с интенсивным автомобильным движением. Длина всей трассы составляла 2.25 км, зона 1 простиралась до расстояния $L \sim 0.5$ км, средняя зона (зона 2) доходила до расстояния $L \sim 0.85$ км и далее до $L = 2.25$ км простирался лесной массив (3 зона).

2. Результаты измерений и их обсуждение

Измерения велись в течение зимы – весны 2024 года. Эта трасса промерялась и в предыдущий год без разбиения по зонам, причем средняя концентрация на всей трассе в 2024 году оказалась примерно такой же, как и в 2023 году ~ 2.3 - 2.4 ppm, Однако распределение метана по трассе, как показала обработка данных, оказалось неоднородным, рис. 4, кривые 1 и 2.

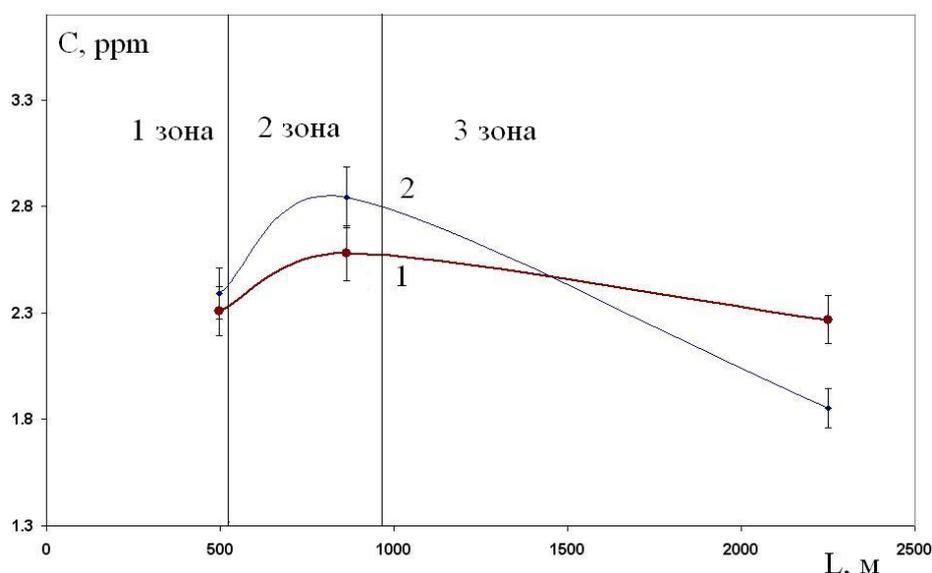


Рис. 4. 1 – средняя концентрация метана в зависимости от измеряемого расстояния, 2 – средняя концентрация в зонах 1, 2, 3.

Обработка полученных данных велась по регрессионному алгоритму. В первой зоне до 1-й вертикальной линии на рис.4 локальная концентрация определялась как средняя концентрация на трассе длиной ~ 0.5 км. Во второй

зоне между первой и второй вертикальными линиями до расстояния $\sim 0,86$ км она определялась как величина C_x из формулы:

$$(C_1 + C_x)/2 = C_2, (3)$$

в третьей зоне между второй и третьей вертикальными линиями как C_y из формулы:

$$(C_2 + C_y)/2 = C_3. (4)$$

Здесь C_1, C_2, C_3 – измеренные значения средних концентраций, полученные на трассах 0.5 км, 0.86 км и 2.25 км, а C_1, C_x, C_y – локальные концентрации в зонах 1,2,3. На рис. 4, кривая 2 показаны обработанные по формулам (3)-(4) результаты измерений. Сравнивая кривые 1 и 2, можно увидеть, что зональные концентрации метана по трассе гораздо сильнее отличаются друг от друга, чем средние измеренные концентрации на трассах 0.5 км, 0.86 км и 2.25 км. Так если в конце 3 зоны, расположенной над лесным массивом, величина концентрации оказалась порядка ~ 1.7 ppm, то средняя концентрация на трассе 2.25 км была на уровне 2.3 ppm за счет близлежащей 2 зоны с большим содержанием газа. Особенно сильно выделяется зона 2 с повышенным содержанием газа. Эта зона с многоэтажной газифицированной застройкой, где средняя концентрация за все время измерений составила величину ~ 2.8 ppm. То есть, томографический метод обработки результатов измерений позволяет выявить те зоны, где повышена концентрация метана, причем зоны могут быть длиной порядка 50 метров и менее, что облегчает поиск утечек газа, например на магистральном газопроводе. В нашем случае вполне определенно можно сказать, что даже на достаточно малом масштабе расстояний можно выявить зону с повышенной концентрации газа (зона многоэтажной застройки с газовой инфраструктурой) и зоны с пониженной концентрацией (лесной массив и многоэтажная застройка без газовой инфраструктуры). Некоторые коррективы в томографические исследования могут вносить направление и скорость ветра, а также температура воздуха в периоды измерений, которые необходимо учитывать в процессе измерений.

Заключение

Таким образом, проведены томографические измерения фоновой концентрации метана вдоль трассы длиной ~ 2.25 км в районе северо-востока Московской области с помощью активного лидара в диапазоне длин волн ~ 1653 нм в зимне-весенний период 2024 года с целью локализации выбросов газа и контроля утечек в неблагоприятных зонах. Макет лидара, включал в себя мощный рамановский усилитель и позволял измерять расстояние до точки отражения с точностью не хуже 50 метров. Лидар сканировал трассу, начиная с коротких дистанций и заканчивая измерения на всей измеряемой трассе. Трасса включала в себя ближнюю зону с современной многоэтажной застройкой, среднюю зону с многоэтажной застройкой и газовой инфраструктурой, а также протяженный лесной массив, заканчивающийся оживленной трассой с интенсивным автомобильным движением. Наблюдения велись в течение зимнее весеннего периода и проводились в различное время суток при различных погодных условиях, в основном при температурах окружающего воздуха вблизи 0 °С. Обработка результатов показала существенно-различный вклад каждой из зон в среднюю концентрацию на трассе. Особенно большим оказался вклад средней зоны с многоэтажной застройкой, оборудованной газовой инфраструктурой, что позволяет говорить о возможной утечке газа из газораспределительной системы в данном районе. В среднем концентрация фона метана на данной трассе повторила величину, измеренную в 2023 году в такой же сезонный период 2023 года.

Финансирование: Работа выполнена по Госзаданию ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. Siddans R. et al. Global height-resolved methane retrievals from the Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI) on MetOp // Atmospheric Measurement Techniques. – 2017. – Т. 10. – №. 11. – С. 4135-4164.
2. Weidmann D. et al. The methane isotopologues by solar occultation (miso) nanosatellite mission: spectral channel optimization and early performance analysis // Remote Sensing. – 2017. – Т. 9. – №. 10. – С. 1073.
3. Информационное агентство «Интер Райт». Спутник «Мерлин» измерит содержание метана и углекислого газа в атмосфере Земли. URL: https://inright.ru/news/science/20100920/id_4139
4. Пергам-Инжиниринг. Услуги по поиску и инвентаризации выбросов метана. URL: <https://www.pergam.ru/services/poisk-utechek-metana/>
5. CBC/Radio-Canada. Canadian satellite detects huge burst of methane from Russian coal mine: <https://www.cbc.ca/news/science/russia-methane-leak-1.6489675>
6. Григорьевский В.И. и др. Лидарный мониторинг фоновой концентрации метана на северо-востоке московской области // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11.

Для цитирования:

Григорьевский В.И., Тезадов Я.А. Томографический измеритель концентрации метана на приземных трассах // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.10.1>