

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.9>

УДК: 504.064.3

КОНЦЕПЦИЯ ДВУХКАНАЛЬНОГО ИНФРАКРАСНОГО ЛИДАРА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

С.В. Яковлев, С.А. Садовников, Н.С. Кравцова

Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской
академии наук, 634055, Томск, площадь Академика Зуева, 1

Статья поступила в редакцию 14 марта 2023 г.

Аннотация. Представлены результаты расчета спектра пропускания атмосферы и моделирования лидарных сигналов в информативном диапазоне зондирования парниковых газов (CO_2 , H_2O) на горизонтальных тропосферных трассах с использованием разрабатываемой двухканальной лидарной системы инфракрасного диапазона. Показано, что предпочтительным для одновременного зондирования CO_2 и H_2O является спектральный диапазон работы лидарной системы $4878\text{--}4894\text{ см}^{-1}$ ($2043\text{--}2050\text{ нм}$), в котором уровень лидарных сигналов лежит в интервале значений $10^{-6}\text{--}10^{-10}\text{ Вт}$ и превышает эквивалентную мощность шума фотодетектора. По результатам проведенных расчетов определен технический облик разрабатываемой двухканальной лидарной системы инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: лидар, атмосфера, парниковые газы, инфракрасный диапазон.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10203, <https://rscf.ru/project/22-79-10203/>.

Автор для переписки: Яковлев Семён Владимирович, ysv@iao.ru

Введение

В вопросах исследования окружающей среды большое значение имеет возможность применения дистанционных методов для измерения её параметров. Парниковые газы играют определяющую роль в формировании климата на планете и оказывают влияние на тренд температуры на Земле. По этой причине актуальной на сегодняшний день является задача контроля концентраций парниковых газов с использованием методов и средств дистанционного зондирования. Водяной пар (H_2O) является самым активным из парниковых газов. Его вклад в парниковый эффект, согласно различным источникам, составляет порядка пятидесяти процентов. Углекислый газ (CO_2) является одним из наиболее сильно поглощающих инфракрасное излучение газов и по вкладу в парниковый эффект стоит на втором месте после водяного пара. С точки зрения дистанционного газоанализа атмосферы ближний инфракрасный (ИК) диапазон представляет значительный интерес, ввиду расположения в нём полос поглощения основных парниковых газов (углекислый газ – CO_2 и водяной пар – H_2O). Среди методов газоанализа можно выделить метод дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) [1-2] и дифференциальную оптическую абсорбционную спектроскопию (ДОАС) [3]. Целью исследовательской работы является разработка ИК-лидарной системы для одновременного восстановления пространственно-разрешенных профилей и усреднённых вдоль горизонтальной трассы зондирования концентраций исследуемых парниковых газов (CO_2 , H_2O) с использованием ДПР- и ДОАС-каналов регистрации. Разработка любой лидарной системы требует предварительного численного моделирования в части выбора информативных диапазонов (длин волн) зондирования, оценки обратно рассеянного сигнала и дальности зондирования. Результаты решения данных задач представлены далее.

1. Дистанционные методы зондирования парниковых газов

Основной принцип действия лидара ДПР заключается в том, что часть обратно рассеянного лазерного излучения поглощается и рассеивается

молекулами и аэрозольными частицами при прохождении через атмосферу. Лазерный пучок ослабляется (в соответствии с законом Ламберта–Бера) за счёт молекулярного и аэрозольного поглощения и рассеяния. Сигнал $P(z, \lambda)$ из рассеивающего слоя толщиной Δz можно представить в виде [1,4]:

$$P_R(z, \lambda) = P_0(\lambda) \frac{A_D}{z^2} \eta(\lambda) G(z) \Delta z \beta(z, \lambda) e^{[-2\tau(z, \lambda)]}, \quad (1)$$

где $P_0(\lambda)$ – мощность лазерного излучения; A_D – площадь приёмного телескопа; $G(z)$ – функция перекрытия между лазерным лучом и полем зрения приемника; $\beta(z, \lambda)$ – объемный коэффициент обратного рассеяния; $\eta(\lambda)$ – эффективность приемо-передающей системы; Δz – пространственное разрешение по трассе зондирования; $\tau(z, \lambda)$ – объемный коэффициент ослабления.

ДПР заключается в определении концентрации атмосферного газа по разнице лидарных сигналов на длинах волн λ_{on} и λ_{off} с разным молекулярным поглощением.

Концентрация исследуемого газа определяется следующим образом:

$$n(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}\Delta z} \ln \left(\frac{P_R(z, \lambda_{on})P_R(z + \Delta z, \lambda_{off})}{P_R(z, \lambda_{off})P_R(z + \Delta z, \lambda_{on})} \right), \quad (2)$$

где $\Delta\sigma_{abs}$ – сечение поглощения.

Метод ДООС позволяет проводить измерение пропускания атмосферы с использованием широкополосных источников излучения с полушириной на полувысоте от единиц до сотен нанометров. Молекулярное поглощение (шириной порядка нескольких нанометров) в ДООС отделяется от рассеяния по закону Ламберта–Бера, которое слабо зависит от длины волны и может быть удалено с помощью высокочастотного фильтра. Кроме того, путем подбора (например, методом наименьших квадратов) рассчитанного молекулярного поглощения к наблюдаемому, возможно одновременное измерение концентраций нескольких поглощающих газов. В случае проведения ДООС измерений в первую очередь необходимо найти отношение наблюдаемого спектра (P_{OBS}) к референтному (P_{REF}), которое определяется из спектра лазерного источника (P_0), полученного одним и тем же детектором:

$$\left(\frac{P_{\text{OBS}}(v_j, z_i)}{P_{\text{REF}}(v_j, z_i)} \right) = \exp \left(-2\Delta z \sum_{k=0}^j \alpha_{j,k} + \ln(\beta_{j,k}) \right) \times$$

$$\times \int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} f(v, v_j) \times$$

$$\times \exp \left(-\Delta z \sum_{k=0}^{i-1} \sum_g^{N_{\text{gases}}} (\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g + \alpha_{\text{ma}}(v, z_{k+1})_g) \right) dv,$$

где

$$\alpha_{j,k} = \alpha(v_j, z_k),$$

$$\beta_{j,k} = \beta(v_j, z_i),$$

$$\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g = n_g(z_k) K_g(v, z_k),$$
(3)

где $\alpha(v_j, z_k)$ – коэффициент ослабления анализируемой среды; $\beta(v_j, z_i)$ – коэффициент обратного рассеяния, включающий молекулярное и аэрозольное рассеяние в направлении назад; $\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g$ – профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения; Δv – разрешающая способность приемника; $f(v, v_j)$ – аппаратная функция приемника на частоте v_j ; N_{gases} – число учитываемых газов; $K_g(v, z_k)$ – коэффициент поглощения соответствующего газа; $n_g(z_k)$ – концентрация газовой компоненты.

Отношение ($P_{\text{OBS}}/P_{\text{REF}}$) не зависит от спектра излучения лазерного источника или спектральной зависимости принимающей оптики, спектрографа, приемника, что является важным преимуществом ДОАС метода. Измеряемая таким образом величина составляет разницу содержания поглощающих газов в референтном случае и в случае открытой атмосферы.

2. Расчет спектра пропускания атмосферы и численное моделирование лидарного сигнала в информативном диапазоне зондирования парниковых газов

С применением базы данных HITRAN [5] рассчитывались спектры пропускания (T) атмосферы. Моделирование спектров проведено для условий атмосферы лета средних широт. При проведении моделирования стояла задача определения информативных спектральных интервалов зондирования CO_2 , H_2O для проведения ДОАС измерений, выбора необходимых для ДПР значений

$\nu_{\text{on}}(\lambda_{\text{on}})$ и $\nu_{\text{off}}(\lambda_{\text{off}})$ для последующей настройки источника излучения разрабатываемой лидарной системы на информативные длины волн и диапазоны зондирования CO_2 , H_2O в ИК-области спектра.

Для поиска информативных длин волн и диапазонов зондирования CO_2 , H_2O была исследована ближняя ИК спектральная область в диапазоне значений $4800\text{--}5100\text{ см}^{-1}$ ($1960\text{--}2083\text{ нм}$). Протяжённость трассы зондирования соответствовала 1 км , аппаратная функция (АФ) – $6,5$ и $0,1\text{ см}^{-1}$. Аппаратная функция $6,5\text{ см}^{-1}$ соответствует ширине линии излучения лазера в передающей части лидара и расчет для данного значения необходим с целью выбора информативных полос зондирования (включающие $\nu_{\text{on}}(\lambda_{\text{on}})$ и $\nu_{\text{off}}(\lambda_{\text{off}})$) по методу ДПР. Результаты моделирования для аппаратной функции $6,5\text{ см}^{-1}$ показали, что предпочтительно использовать для ДПР зондирования линии поглощения H_2O и CO_2 в диапазоне $4878\text{--}4894\text{ см}^{-1}$ ($2043\text{--}2050\text{ нм}$). Расчёт с использованием $\text{АФ}=0,1\text{ см}^{-1}$ проводился для выделения в полосе зондирования $4878\text{--}4894\text{ см}^{-1}$ линий поглощения исследуемого газа по методу ДОАС. Концентрация зондируемых компонент при моделировании соответствует значениям 18800 ppm (H_2O) и $402,1\text{ ppm}$ (CO_2). Также учитывалось мешающее поглощение сторонними газами. Значения концентраций целевых (H_2O , CO_2) и сторонних газов соответствуют фоновому состоянию атмосферы в черте города. На рисунке 1 представлены результаты расчета спектра пропускания атмосферы для спектрального диапазона $4878\text{--}4894\text{ см}^{-1}$, наиболее предпочтительного для ДОАС и ДПР зондирования.

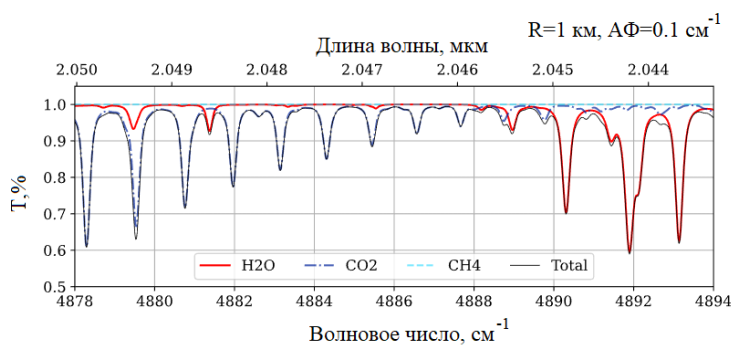


Рис. 1. Спектр пропускания атмосферы (Т) в информативном диапазоне зондирования H_2O и CO_2

Далее, проведено численное моделирование эхо-сигналов при зондировании H_2O , CO_2 двухканальным лидаром ИК-диапазона. Входные данные для проведения численного моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Входные данные для проведения численного моделирования лидарного сигнала при зондировании H_2O , CO_2

Детектируемый газ	H_2O	CO_2
Концентрация, ppm Лето средних широт	18800	402,1
Дальность зондирования, км	≤ 3	
Диапазон длин волн зондирования, нм	1960–2083	
Волновое число, cm^{-1}	4800–5100	
Энергия в импульсе, мДж	4	
Аппаратная функция (АФ), cm^{-1}	0,1; 6,5	
Геометрия трассы зондирования	горизонтальная	
Диаметр приемной апертуры, мм	300	
Эквивалентная мощность шума (NEP), Вт/Гц ^{0,5}	$1 \cdot 10^{-12}$	

Результаты моделирования приведены на рисунке 2.

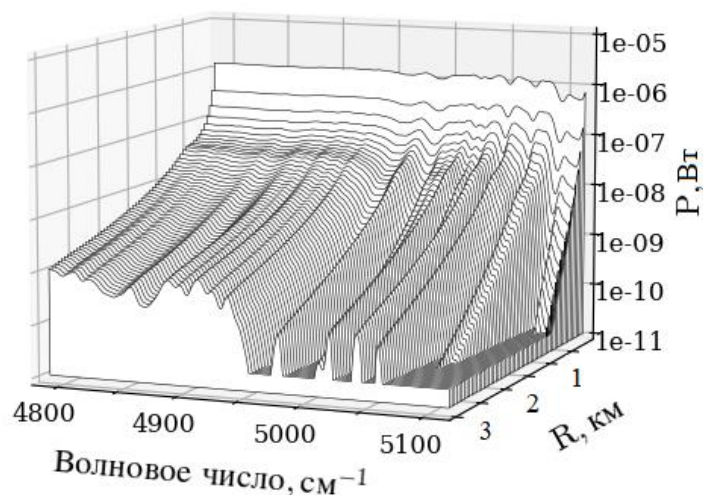


Рис. 2. Результат моделирования лидарного сигнала в информативном диапазоне зондирования H_2O и CO_2

Из рисунка 2 видно, что для полосы поглощения в выбранном спектральном диапазоне $4878\text{--}4894\text{ см}^{-1}$ уровень лидарного сигнала лежит в интервале значений $10^{-6}\text{--}10^{-10}$ Вт, что превышает NEP фотодетектора 10^{-12} Вт.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности регистрации лидарных сигналов с заданными характеристиками двухканальной ИК-лидарной системы.

3. Двухканальный лидар для зондирования парниковых газов

По результатам проведенных расчетов и численного моделирования определен технический облик разрабатываемой двухканальной лидарной системы ИК-диапазона. На рисунке 3 представлены технические составляющие приемопередающей части двухканального лидара и трасса зондирования парниковых газов в промышленном центре г. Томска.



Рис. 3. Технические составляющие (элементы 1–4 слева) приемопередающей части двухканального лидара и трасса зондирования (фото справа) парниковых газов в промышленном центре г. Томска

1) Лазерный источник и коллиматор.

В качестве источника излучения лидара используется лазерная система компании SOLAR LS, генерирующая излучение в спектральном диапазоне $4800\text{--}5100\text{ см}^{-1}$ и изготовленная по индивидуальному заказу Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) для решения задач газоанализа атмосферы. Внешний вид лазерной системы представлен на рисунке 4а. На рисунке 4б показана экспериментально измеренная форма лазерного пучка на выходе источника излучения лидара (диаметр пучка – 7.967 мм).

Измерения формы пучка проведены с использованием визуализатора лазерного излучения ИК2-3Л.



а)



б)

Рис. 4. Источник излучения лидара (а) и форма пучка на выходе лазерной системы (диаметр пучка 7.967 мм) (б)

Для контроля уровня выходной энергии в импульсе информативного излучения лидара в передающую часть включены два измерителя мощности/энергии. С целью подтверждения применимости представленного лазера для построения лидара были проведены измерения выходной энергии в импульсе. С использованием разработанной программы проводилась автоматическая перестройка длины волны лазера по информативному спектральному диапазону $4800\text{--}5100\text{ см}^{-1}$ (1960–2083 нм). Перестройка длины волны обеспечивалась поворотом шаговых двигателей лазера. На каждой из длин волн работы лазерного источника излучения проводилось 10 измерений выходной энергии в импульсе, после чего рассчитывалось ее среднее значение, и лазер автоматически переключался на следующую длину волны генерации. Результаты измерений при автоматической перестройке длины волны в информативном спектральном диапазоне работы лазера представлены на рисунке 5.

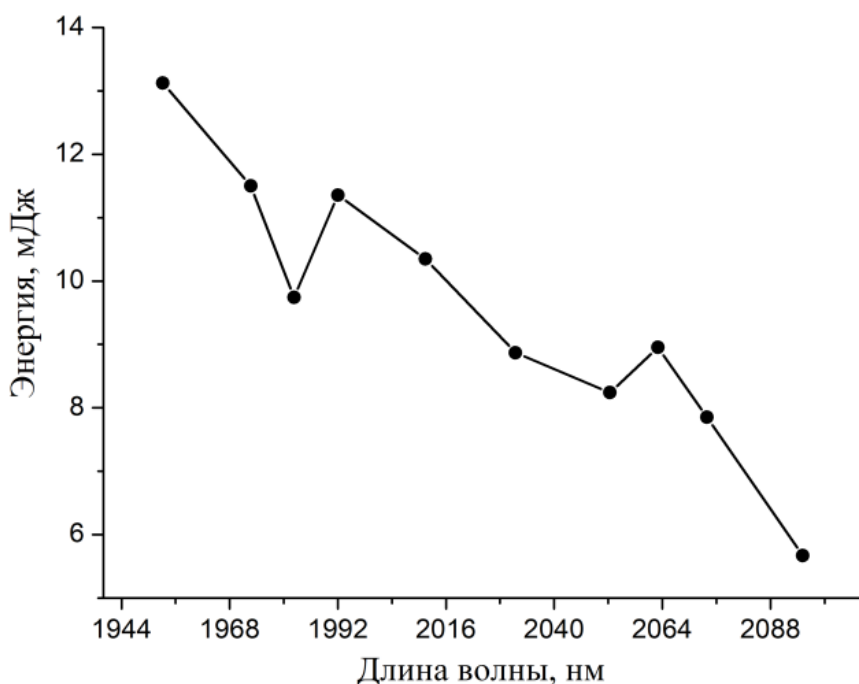


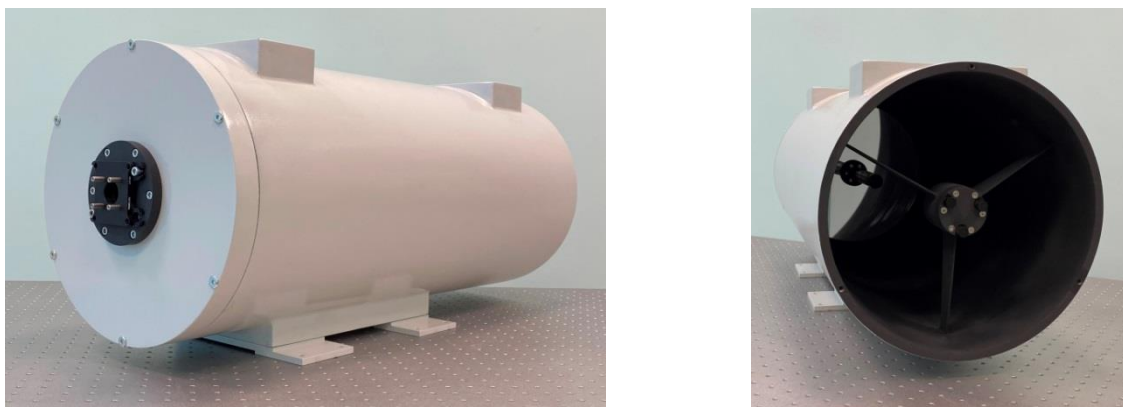
Рис. 5. Среднее значение выходной энергии в импульсе источника излучения лидарной системы ИК-диапазона в информативном спектральном диапазоне $4800\text{--}5100\text{ см}^{-1}$ (1960–2083 нм)

Таким образом, лазер имеет выходные значения энергии в импульсе ≥ 4 мДж, заложенных в численное моделирование параметров лидара, что достаточно для работы в составе лидарной системы ИК-диапазона.

Также в передающую часть лидара включен зеркальный коллиматор, предназначенный для уменьшения расходимости лазерного излучения. Таким образом, коллимированный лазерный пучок направляется в атмосферу вдоль исследуемой трассы, претерпевает аэрозольное и молекулярное поглощение и рассеяние, которое в дальнейшем регистрируется приёмной частью.

2) Приёмный телескоп Мерсенна.

Излучение, рассеянное из атмосферы в направлении лидара, собирается телескопом, сконструированным по схеме Мерсенна и изготовленным в ИОА СО РАН. Диаметр приёмной апертуры телескопа составляет 300 мм. Стоит заметить, что на выходе из телескопа формируется коллимированный пучок. Внешний вид приёмного телескопа представлен на рисунке 6.

Рис. 6. Приемный телескоп Мерсенна ($D = 300$ мм)

Излучение, рассеянное из атмосферы в направлении лидара и собранное телескопом, разделяется дихроичным зеркалом на два канала: ДПР- и ДОАС-каналы регистрации обратно рассеянного сигнала.

3) ДПР-канал регистрации обратно рассеянного сигнала.

Отталкиваясь от результатов численного моделирования в ДПР-канале регистрации планируется использование двух InGaAs детекторов. Технические характеристики детекторов представлены в таблице 2. ДПР-канал регистрации используется для восстановления пространственного распределения концентрации целевого газа.

Таблица 2. Технические характеристики InGaAs детектора

Параметр	Значение
Рабочий диапазон, нм	900-2600
Время нарастания сигнала, нс	17
Диаметр фоточувствительной зоны детектора, мм	0,5
Активная область детектора, мм	0,2 мм ²
NEP, Вт/Гц ^{1/2}	10 ⁻¹²

4) ДОАС-канал регистрации обратно рассеянного сигнала.

В ДОАС-канале регистрации планируется использование спектрографа, который производит разложение излучения в спектр и направляет его на линейчатый фотодетектор для преобразования оптических сигналов в электрические. Основные технические характеристики спектрографа: спектральное разрешение 0,17–0,1 см⁻¹, одновременный регистрируемый

спектральный интервал 21,6–40,34 нм. Спектральный диапазон работы линейчатого фотодетектора 0,9–2,55 мкм, ширина пикселя 50 мкм, количество пикселей 256, АЦП 16 бит, время накопления 8 мкс–3,5 мс. Внешний вид спектрографа для регистрации обратно рассеянного сигнала представлен на рисунке 7.

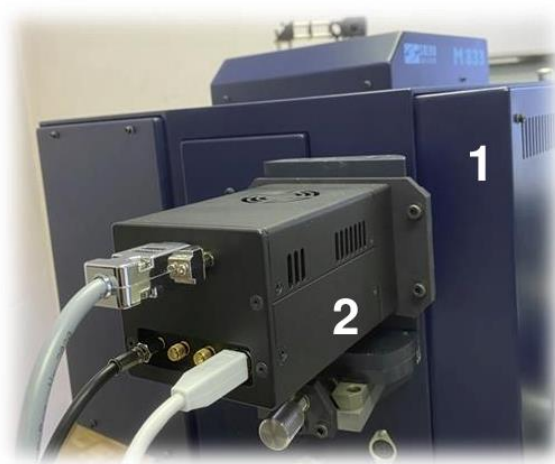


Рис. 7. Оборудование для ДОАС канала регистрации обратно рассеянного сигнала (1– спектрограф М833; 2 – линейчатый фотодетектор)

Регистрация сигналов с двух каналов и их последующая обработка обеспечивает возможность восстановления пространственного распределения и усреднённых значений концентраций атмосферных газов вдоль трассы зондирования. Перестройка длины волны излучения лазерного источника может обеспечить дистанционный контроль концентраций водяного пара и углекислого газа. Предполагается использование ДОАС-канала для получения интегральных значений концентрации исследуемого атмосферного газа на заданной трассе зондирования для корректировки пространственно разрешенных профилей концентрации газа, восстановленных с использованием ДПР-канала регистрации.

Заключение

Проведен расчет спектров пропускания атмосферы и моделирование лидарных сигналов в информативном диапазоне зондирования парниковых газов (CO_2 , H_2O) на горизонтальных тропосферных трассах с использованием

характеристик разрабатываемой двухканальной лидарной системы ИК-диапазона. Анализ показал, что одним из наиболее предпочтительных диапазонов для ДПР и ДОАС зондирования целевых газов является спектральная область 4878–4894 см⁻¹ (2043–2050 нм). Это обусловлено наличием в данном диапазоне изолированных линий поглощения как СО₂, так и Н₂О. Результаты моделирования лидарных сигналов показали, что для полосы поглощения в спектральном диапазоне 4878–4894 см⁻¹ их уровень для дальности зондирования ≤3 км лежит в интервале значений 10⁻⁶–10⁻¹⁰ Вт и превышает эквивалентную мощность шума фотодетектора 10⁻¹² Вт. По результатам проведенных расчетов и численного моделирования определен технический облик разрабатываемой двухканальной лидарной системы ИК-диапазона.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10203, <https://rscf.ru/project/22-79-10203/>.

Литература

1. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я. *Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы*. Томск, ИОА СО РАН. 2014. 508 с.
2. 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>
3. Platt U., Stutz J. *Differential optical absorption spectroscopy*. Berlin, Springer-Verlag. 2008. 597 p.
4. Межерис Р.М. *Лазерное зондирование атмосферы*. Москва, Мир. 1987. 550 с.
5. Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Wcislo P., Finenko A.A., Nelson K., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Coustenis A., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Mlawer E.J., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Rotger M., Tennyson J., Toon G.C., Tran

H., Tyuterev V.G., Adkins E.M., Baker A., Barbe A., Cane E., Csaszar A.G., Dudaryonok A., Egorov O., Fleisher A.J., Fleurbaey H., Foltynowicz A., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.–M., Horneman V.–M., Huang X., Karman T., Karns J., Kassi S., Kleiner I., Kofman V., Kwabia–Tchana F., Lavrentieva N.N., Lee T.J., Long D.A., Lukashevskaya A.A., Lyulin O.M., Makhnev V.Yu., Matt W., Massie S.T., Melosso M., Mikhailenko S.N., Mondelain D., Muller H.S.P., Naumenko O.V., Perrin A., Polyansky O.L., Raddaoui E., Raston P.L., Reed Z.D., Rey M., Richard C., Tobias R., Sadiék I., Schwenke D.W., Starikova E., Sung K., Tamassia F., Tashkun S.A., Vander Auwera J., Vasilenko I.A., Vigasin A.A., Villanueva G.L., Vispoel B., Wagner G., Yachmenev A., Yurchenko S.N. The HITRAN2020 Molecular Spectroscopic Database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. 2022. V.277. №107949. P.1-82. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2021.107949>

Для цитирования:

Яковлев С.В., Садовников С.А., Кравцова Н.С. Концепция двухканального инфракрасного лидара для мониторинга парниковых газов в приземном слое атмосферы. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.9>