

ЭКОЛОГИЯ / ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7>

ТРАССОВЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Научная статья

Кравцова Н.С.^{1,*}, Садовников С.А.², Герасимова М.П.³

¹ORCID : 0000-0001-6862-8388;

²ORCID : 0000-0002-3082-3521;

^{1,2,3} Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kravtsova[at]iao.ru)

Аннотация

Как известно, неуклонный рост концентрации углекислого газа приводит к существенному усилению парникового эффекта на планете Земля. Основное внимание при этом сконцентрировано на его способности влиять на глобальный климат. Гораздо реже обсуждается непосредственное влияние роста концентрации и особенности пространственного распределения этого газа на площади лесных массивов и развитие агрокультур. По некоторым оценкам, накопление углекислого газа в атмосфере привело к тому, что сибирские леса не справляются с поглощением такого количества углекислого газа. Очевидно, что в период столь бурных климатических изменений крайне важно проводить интенсивный мониторинг газового состава атмосферы, в том числе углекислого газа.

Ключевые слова: углекислый газ, атмосфера, лидар.

ROUTE CARBON DIOXIDE METER

Research article

Kravtsova N.S.^{1,*}, Sadovnikov S.A.², Gerasimova M.P.³

¹ORCID : 0000-0001-6862-8388;

²ORCID : 0000-0002-3082-3521;

^{1,2,3} V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

* Corresponding author (kravtsova[at]iao.ru)

Abstract

The steady increase in carbon dioxide concentrations is known to result in a significant intensification of the greenhouse effect on planet Earth. The main focus has been on its ability to influence the global climate. Much less discussed is the direct impact of the rising concentrations and spatial distribution of the gas on forested areas and agricultural crops. Some assessments suggest that the accumulation of carbon dioxide in the atmosphere has rendered the Siberian forests unable to absorb such an amount of carbon dioxide. Clearly, at a time of such rapid climate change, it is vital that the gas composition of the atmosphere, including carbon dioxide, be monitored intensively.

Keywords: carbon dioxide, atmosphere, lidar.

Введение

Изменение климата и состояния окружающей среды – одна из самых сложных проблем, с которой человечество столкнулось в конце прошлого столетия. Измерение концентраций газов в атмосфере на трассах различной протяжённости является одним из актуальных направлений исследований и может применяться как для фундаментальных исследований динамики парниковых газов в различных регионах, так и при решении широкого круга прикладных задач. Наряду с пробоотборными подходами при решении научной проблемы наблюдения за газовым составом атмосферы активно применяются лидарные методы и системы зондирования [1, С. 148–262], [2, С. 1–7], [3, С. 1–17].

Лидарные системы обладают рядом существенных преимуществ и позволяют бесконтактно и дистанционно регистрировать данные о параметрах атмосферы в различных пространственных масштабах. Инфракрасный (ИК) диапазон спектра представляет значительный интерес в вопросах наблюдения за концентрациями парниковых газов и обнаружения повышенного содержания техногенных газов в атмосфере, так как в нём расположен большой набор полос поглощения различных газов.

Трассовый метод дифференциального поглощения

При разработке систем дистанционного газоанализа могут применяться самые различные источники излучения: естественные (излучение Солнце и отраженное от Луны солнечное излучение), широкополосные лазеры, узкополосные лазерные диоды, газовые лазеры и т.д. Однако особый интерес представляют системы, основанные на лазерах с параметрической генерацией света (ПГС), которые способны обеспечивать широкий спектральный диапазон высокоэнергетического перестраиваемого излучения. В рамках исследования решалось несколько задач: расчет лидарных сигналов, отражающихся от топографических объектов, так как планируется применение трассовой схемы зондирования с использованием метода дифференциального поглощения [4, С. 1–26], [5, С. 232–268], разработка конструкции лидара. В методе дифференциального поглощения при зондировании используется от двух линий генерации лазерного излучения (т.н. online и offline), одна из которых попадает в максимум линии поглощения исследуемых молекул, а вторая располагается вне этой линии, либо на её крыле. Информация о концентрации

исследуемых газов в атмосфере извлекается путём сравнения регистрируемых лидарных сигналов на этих двух или более длинах волн. Трассовая схема зондирования для решения подобных задач предполагает регистрацию лазерного излучения, отраженного от топографических целей.

На первом этапе работы проводился расчёт спектров пропускания газовой смеси в кювете для определения положения наиболее мощных полос поглощения углекислого газа. Далее для обнаруженных областей поглощения было проведено численное моделирование спектров пропускания атмосферы. На основе полученных результатов были обнаружены поддиапазоны с наименьшим влиянием водяного пара. После решения данных задач, можно было переходить к расчёту лидарных сигналов. Расчёт лидарных сигналов проводился для двух пограничных случаев – тропики и полярные широты (см. рис. 1).

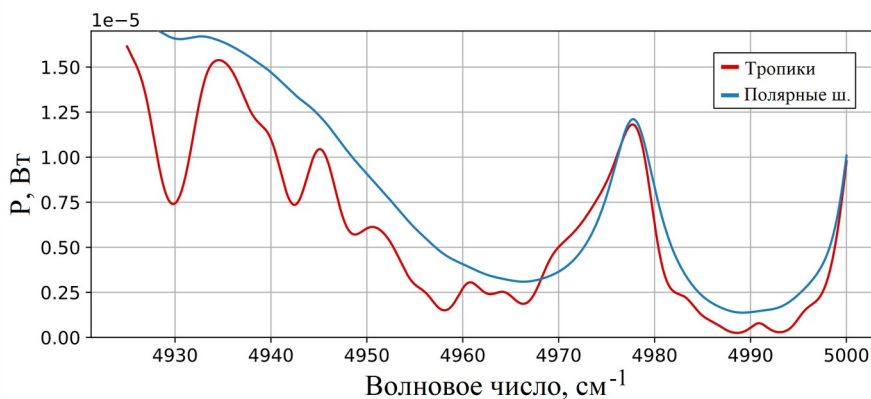


Рисунок 1 - Лидарные сигналы трассового зондирования углекислого газа
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7.1>

Примечание: протяжённость трассы 1 км, альbedo отражающей поверхности 0,1

Уровень изображённых на рисунке 1 лидарных сигналов для тропических и полярных широт [6, С. 172–173] свидетельствует о возможности эффективной регистрации обратно-рассеянного излучения в выбранном спектральном диапазоне. Выбранные длины волн зондирования попадают на участки с различным поглощением целевого газа, поэтому могут быть использованы на трассах различной протяжённости.

Калибровка длин волн генерации лазера

Для корректной работы лидарных систем дистанционного газоанализа атмосферы неотъемлемым этапом является калибровка длин волн генерации лазера. В рамках настоящей работы калибровка положения линий излучения параметрического генератора ближнего ИК диапазона проводилась с применением газовой кюветы, наполненной целевым газом (CO_2). На рисунке 2 представлена схема эксперимента по калибровке спектрального положения линии генерации лазера.

Перед экспериментом производились следующие действия: в первую очередь к газовой кювете подсоединялся газовый баллон наполненный CO_2 (ГОСТ 8050-85). Для регулировки подачи углекислого газа в кювету применялся редуктор УР 6 6 mini (Krass, Россия, Китай). Подключение редуктора к газовой кювете производилось с использованием силиконового шланга. Для вытеснения из газовой кюветы сторонних газов производилась продувка углекислым газом.

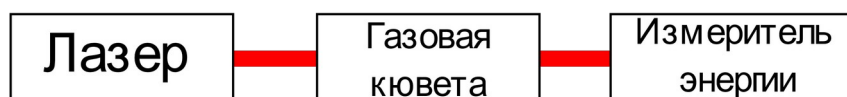


Рисунок 2 - Схема эксперимента по калибровке положения линии генерации
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7.2>

Эксперимент по калибровке длин волн генерации производился следующим образом: путём поворота нелинейных кристаллов лазера с использованием шаговых двигателей выставлялась теоретически ожидаемая длина волны генерации, производился запуск генерации и регистрация ста импульсов с помощью измерителя энергии/мощности PM100USB (Thorlabs, США) с пирозлектрической головкой, после чего данный цикл повторялся для последующих длин волн. Важно отметить, что длина волны генерации регистрировалась косвенно – по сигнальной волне первого каскада генерации, излучение которого входит в видимый диапазон спектра (709-757 нм), с применением измерителя длины волны SHR (Solar LS, Минск). Эксперимент проводился в два этапа – без газовой кюветы на пути

распространения излучения и с ней. Первое измерение выступало в качестве референтного, второе – в качестве информативного. Так как коэффициент пропускания – есть не что иное, как отношение потока излучения, прошедшего сквозь среду, к потоку, падающему на её поверхности [7], то из соотношения измеренных сигналов можно восстановить приближённый ход спектра пропускания газовой кюветы (см. рис. 3). Именно данная процедура и была проведена. В качестве примера на рисунке 3 представлен результат восстановления спектра пропускания, полученный представленным способом.

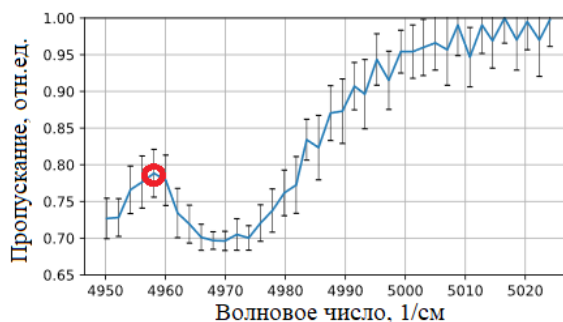


Рисунок 3 - Восстановленный спектр пропускания газовой смеси
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7.1>

С учётом характеристик лазера и газовой кюветы восстановленный спектр пропускания газовой смеси, представленный на рисунке 3, соответствует теоретически ожидаемому и подтверждает возможность использования лазерного источника для перехода к проведению работ по измерению концентрации углекислого газа в атмосферных условиях.

Программа автоматического формирования перестроечной кривой лазера с ПГС и конструкция лидара

При эксплуатации параметрических генераторов света с угловым синхронизмом одной из возможностей для доработки является частичное изменение конфигурации лазерной системы, например, смена диапазона генерации путём замены нелинейных кристаллов. По этой причине одной из часто возникающих задач является формирование перестроечных кривых лазера, а именно, зависимостей положения шаговых двигателей и дифрагирующих элементов от длины волны генерации. Зачастую подобные системы обладают набором шаговых двигателей для более удобной, быстрой и точной установки нелинейных кристаллов и дифракционных решёток в положения, наиболее пригодные для эффективной генерации. Несмотря на относительно простоту процедуры формирования перестроечных кривых, при работе с лазерами, перестраивающимися в широких диапазонах спектра (сотни нанометров), она приобретает крайне время- и трудозатратный характер. Именно по этой причине одна из задач настоящего проекта состояла в разработке программы автоматического формирования перестроечной кривой лазера с параметрической генерацией света.

Принцип работы программы заключается в следующем – на вход программы подаётся не менее трех реперных точек для каждой из перестроечных кривых, определяющих положение дифракционной решётки, кристаллов первого и второго каскада, полученных в ходе первичных экспериментов. Следующий шаг – формирование сглаженных перестроечных кривых с использованием полиномиальных функций различных порядков. На рисунке 4 представлены результаты работы программы.

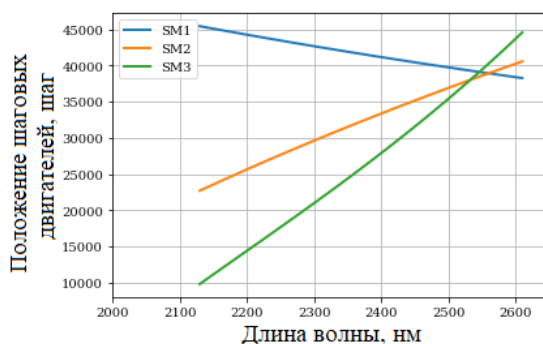


Рисунок 4 - Рассчитанные перестроечные кривые
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7.2>

Для контроля корректности рассчитанных функций была разработана программа автоматического измерения зависимости энергии импульса от длины волны генерации. При поставке лазер был укомплектован стандартной программой управления положением шаговых двигателей, однако данная программа ограничена функциями

«ручного» управления. По этой причине в первую очередь был разработан модуль управления шаговыми двигателями для проведения автоматизированных экспериментов без участия оператора. Для решения данной задачи в качестве языка программирования (ЯП) выбран Python 3.8.11 [8], включающий библиотеку «winapi» [9], которая позволяет виртуально управлять приложениями операционной системы «Windows». Применение данной библиотеки позволило обращаться к отдельным полям приложения, обеспечив возможность программного ввода необходимых положений шаговых двигателей, нажимать соответствующие кнопки управления, а именно, «сбросить», «установить», «сбросить и установить» угол поворота.

Вторая часть решения рассматриваемой задачи состояла в автоматизации измерения энергии импульсов с применением упомянутого ранее прибора PM100USB (Thorlabs, США) с пироэлектрическим датчиком. Данная работа проводилась с использованием стандартной библиотеки ctypes, которая позволяет использовать динамически подключаемые библиотеки различных ЯП. Применяя поставляемый с прибором комплект для разработки программного обеспечения, удалось разработать модуль для регистрации лазерных импульсов с возможностью изменения диапазона измерения энергий и количества усредняемых импульсов.

Далее, рассмотренные ранее модули были объединены в единую программу, графический интерфейс которой представлен на рисунке 5.

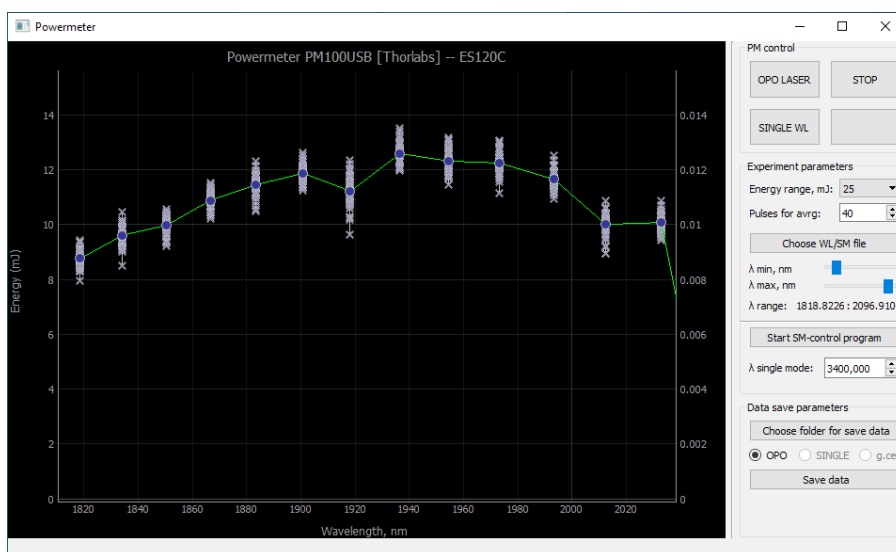


Рисунок 5 - Графический интерфейс программы автоматического измерения зависимости энергии импульса от длины волны

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7.3>

На рисунке 5 помимо графического интерфейса представлен результат одного из измерений по генерации излучения в диапазоне длин волн ~1820-2030 нм. Можно заметить, что на графике в качестве крестиков отображаются результаты каждого отдельного измерения, в качестве синих кружков – усреднённые для каждой длины волны генерации значения энергии импульсов.

Вместе с тем в процессе выполнения задач исследования спроектирована трехмерная модель конструкции лидара для измерения усредненной концентрации углекислого газа в атмосфере (см. рис. 6).

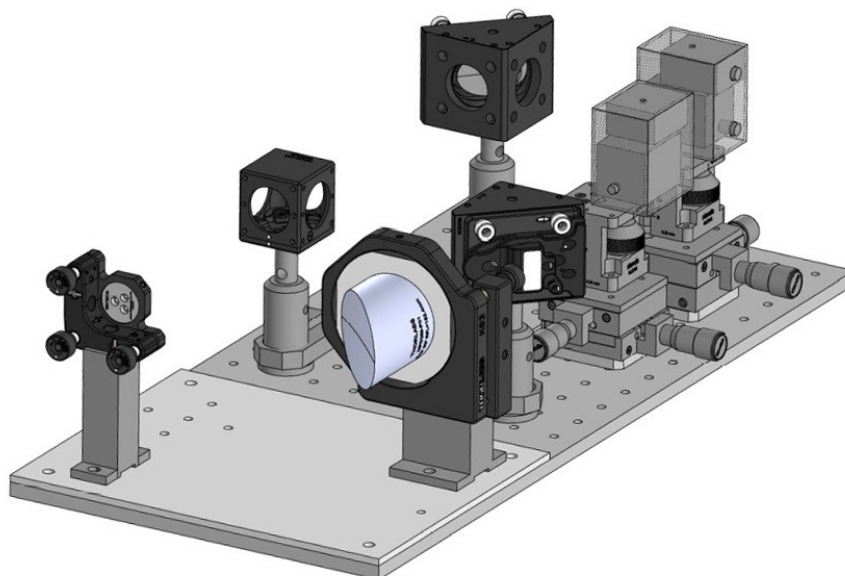


Рисунок 6 - Трехмерная модель приемной части лидара
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.33.7.4>

При разработке конструкции использованы коммерчески-доступные элементы Thorlabs [10] для обеспечения возможности её воспроизведения при возникновении необходимости масштабирования или модификации существующих лидарных установок и в случаях разработки новых систем. Корпусы для фотоприемников предполагается изготавливать с помощью 3D-принтера. Эксплуатация разрабатываемой системы может проводиться в помещениях, либо на передвижных платформах, в которых обеспечивается температура от +15 °С до +27 °С и относительная влажность воздуха от 45% до 60%. При этом условия внешней среды, исходя из результатов численного моделирования спектров пропускания атмосферы и лидарных сигналов, могут варьироваться от тропических до полярных широт, с учётом соответствующих вариаций концентрации водяного пара. При этом на практике предполагается применение данной системы в условиях средних широт.

Заключение

Таким образом, разработана программа обеспечивающая возможность автоматического формирования перестроечной кривой лазера с ПГС с последующей экспериментальной проверкой эффективности его генерации, разработана трехмерная модель конструкции лидара. Косвенный результат разработки программного обеспечения – возможность существенного ускорения проведения экспериментов по измерению спектров пропускания газовых смесей в кювете. На текущий момент проводятся работы по созданию экспериментальной установки для измерения концентраций CO₂ в атмосфере, базирующейся на представленных результатах численного моделирования, разработанных программных модулях и сформированной трёхмерной модели.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1109.2022.4 (в части проведения численного моделирования, разработки программ и создания трехмерной модели приемника лидара) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН (в части построения схемы для проведения калибровки положения линии генерации).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

This work was supported by the grant of the President of the Russian Federation No. МК-1109.2022.4 (in terms of constructing a scheme for assessing the position of the generation line) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (budget funds for IAO SB RAS) (in terms of constructing an experimental scheme for calibrating the position of the generation line).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Привалов В.Е. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы / В.Е. Привалов, А.Э. Фотиади, В.Г. Шеманин — СПб: Лань, 2013. — 288 с.
2. Robinson I. A Robust Optical Parametric Oscillator and Receiver Telescope for Differential Absorption Lidar of Greenhouse Gases. / I. Robinson, J.W. Jack, C.F. Rae // Proceedings of SPIE. — 2015. — 9645. — p. 96450U-1–96450U-7.

3. Pat. 2725351 Канада, МПК1 G01S17/95 . Gas Flux Determination Using Airborne DIAL LIDAR and Airborne Wind Measurement / Lippert J.L., Stearns S.V., Brake D.E.; the applicant and the patentee . — № 1; appl. 2009-12-16; publ. 2010-12-15, — 41 p.
4. Refaat T.F. Airborne Testing of 2- μ m Pulsed IPDA Lidar for Active Remote Sensing of Atmospheric Carbon Dioxide. / T.F. Refaat, M. Petros, C.W. Antill // Atmospher. — 2021. — 12.
5. Межерис Р.М. Лазерное дистанционное зондирование / Р.М. Межерис — М.: Мир, 1987. — 550 с.
6. Зуев В.Е. Статистические модели температуры и газовых компонентов атмосферы / В.Е. Зуев, В.С. Комаров — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 264 с.
7. Коэффициент пропускания // Большая российская энциклопедия. — 2022. — URL: <https://bigenc.ru/c/koeffitsient-propuskaniia-15ac1f> (дата обращения: 10.04.23)
8. Welcome to Python.org. // Python. — 2023. — URL: <https://www.python.org/> (accessed: 10.04.23)
9. Python for Windows (pywin32) Extensions // pywin32. — 2023. — URL: <https://github.com/mhammond/pywin32> (accessed: 10.04.23)
10. Off-Axis Parabolic Mirrors // Thorlabs, Inc. — 2023. — URL: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2313 (accessed: 10.04.23)

Список литературы на английском языке / References in English

1. Privalov V.E. Lazery' i e'kologicheskij monitoring atmosfery' [Lasers and Ecological Monitoring of the Atmosphere] / V.E. Privalov, A.E'. Fotiadi, V.G. Shemanin — SPb: Lan', 2013. — 288 p. [in Russian]
2. Robinson I. A Robust Optical Parametric Oscillator and Receiver Telescope for Differential Absorption Lidar of Greenhouse Gases. / I. Robinson, J.W. Jack, C.F. Rae // Proceedings of SPIE. — 2015. — 9645. — p. 96450U-1–96450U-7.
3. Pat. 2725351 Canada, МПК1 G01S17/95 . Gas Flux Determination Using Airborne DIAL LIDAR and Airborne Wind Measurement / Lippert J.L., Stearns S.V., Brake D.E.; the applicant and the patentee . — № 1; appl. 2009-12-16; publ. 2010-12-15, — 41 p.
4. Refaat T.F. Airborne Testing of 2- μ m Pulsed IPDA Lidar for Active Remote Sensing of Atmospheric Carbon Dioxide. / T.F. Refaat, M. Petros, C.W. Antill // Atmospher. — 2021. — 12.
5. Mezheris R.M. Lazernoe distancionnoe zondirovanie [Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications] / R.M. Mezheris — М.: Мир, 1987. — 550 p. [in Russian]
6. Zuev V.E. Statisticheskie modeli temperatury' i gazovy'x komponentov atmosfery' [Statistical Models of Temperature and Gas Components of the Atmosphere] / V.E. Zuev, V.S. Komarov — Л.: Gidrometeoizdat, 1986. — 264 p. [in Russian]
7. Koeffitsient propuskaniya [Transmittance] // Great Russian Encyclopedia. — 2022. — URL: <https://bigenc.ru/c/koeffitsient-propuskaniia-15ac1f> (accessed: 10.04.23) [in Russian]
8. Welcome to Python.org. // Python. — 2023. — URL: <https://www.python.org/> (accessed: 10.04.23)
9. Python for Windows (pywin32) Extensions // pywin32. — 2023. — URL: <https://github.com/mhammond/pywin32> (accessed: 10.04.23)
10. Off-Axis Parabolic Mirrors // Thorlabs, Inc. — 2023. — URL: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2313 (accessed: 10.04.23)