

УДК 528.8.044.6; 551.501.816; 551.510.52

Мобильный лидар для зондирования тропосферного озона

А.А. Невзоров[✉], А.В. Невзоров, О.В. Харченко,
Н.С. Кравцова, Я.О. Романовский*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 17.03.2023 г.;
после доработки 27.03.2023 г.;
принята к печати 28.03.2023 г.

Разработан и введен в эксплуатацию мобильный озоновый лидар на длинах волн зондирования 299 и 341 нм. Лидар способен охватить высоты от 0,1 до 12 км с пространственным разрешением лидарных сигналов от 1,5 до 150 м. Приведены техническое описание мобильного лидара и результаты натурного эксперимента по лазерному зондированию атмосферы в Томске. Полученные эхосигналы и восстановленные профили озона подтверждают информативность измерений в тропосфере. Выполнено сопоставление лидарных и спутниковых (MetOp) измерений.

Ключевые слова: мобильный лидар, лидарное зондирование, озон; mobile lidar, lidar sensing, ozone.

Введение

Озон является сильнейшим окислителем, поэтому контроль состояния озоносферы — одна из важнейших задач обеспечения безопасности жизни и здоровья человека [1]. С высокой оперативностью и в значительных пространственных масштабах информацию о распределении озона в атмосфере можно получать только с помощью средств мобильного дистанционного лазерного (лидарного) зондирования. Для исследования озона существует ряд методов, среди которых особое место занимает используемый в данном проекте лидарный метод дистанционного обнаружения и идентификации озона с помощью селективного поглощения лазерного излучения (метод дифференциального поглощения [2]), обладающий максимальной чувствительностью.

Первые лидарные системы в составе измерительных станций создавались для наземных экспериментов, однако с развитием элементной базы этих систем горизонт возможностей был расширен. Следующим шагом развития исследовательских лидарных станций стал перенос и адаптация лидарных систем на мобильные платформы: самолеты и автомобили [3–11]. Таким образом расширился круг возможностей научных групп, решающих задачи лазерного зондирования атмосферы. В частности,

исчезла большая часть трудностей экспедиционных кампаний, а именно транспортировка и связанные с этим проблемы сохранения научного оборудования в рабочем состоянии и юстирование лидарных систем стационарной конструкции на месте проведения эксперимента. Появилась возможность проведения исследований на различных территориях объединенной группой мобильных лидарных станций.

Современные тропосферные мобильные лидары позволяют получать достоверные данные о тропосферном озоне [1], концентрация которого, как известно, может измениться в течение нескольких минут. В связи с этим для зондирования озона отводят небольшое время и, как правило, применяют высокое пространственное разрешение. В состав мобильных лидаров входят системы геопозиционирования (GPS или ГЛОНАСС) для определения координат местоположения в момент проведения натурных измерений.

Современные мобильные озоновые лидары, расположенные в трейлерах либо на борту самолета, могут объединяться в исследовательскую группу. Такая конфигурация позволила создать сеть мобильных лидаров TOLNet (Tropospheric Ozone Lidar Network) [3].

Система GSFC TROPOZ DIAL (Goddard Space Flight Center TROPospheric OZone Differential Absorption Lidar) [4], установленная в передвижном 13-метровом трейлере, включает в себя: две ячейки комбинационного рассеяния (ВКР-ячейки) с водородом (H_2) и дейтерием (D_2); импульсный Nd:YAG-лазер (Spectra Physics Quanta-Ray) с длиной волны 266 нм, частотой следования импульсов 50 Гц и энергией в импульсе 42 мДж, с двумя независи-

* Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Наталья Сергеевна Кравцова (kravtsova@iao.ru); Ярослав Олегович Романовский (romanovskii.io17@physics.msu.ru).

мыми параллельными выходами; телескоп, собранный по схеме Ньютона, с зеркалом диаметром 0,45 м для больших высот. Приемная часть системы состоит из четырех небольших телескопов 0,025 м для получения сигнала вблизи поверхности на длинах волн 289 и 299 нм. На основе данных TROPOZ путем решения обратной задачи можно восстанавливать профили концентрации озона на высотах от 400 м до 12 км с пространственным разрешением 275 м (0,1–1,5 км), 525 м (1,5–5 км) и 750 м (3–12 км). Лидарная система способна получать эхосигналы за 20 с.

LMOL (Langley Mobile Ozone Lidar) — мобильный озоновый и аэрозольный лидар, размещенный в трейлере [5]. Лазерный источник LMOL — Nd:YLF-лазер с диодной накачкой (Photonics Industries Int. Inc. DS-527-15). Лазер работает на длине волны 527 нм, частота следования импульсов 1 кГц, энергия в импульсе 12 мДж. Nd:YLF-лазер накачивает настраиваемый кристалл Ce:LiCAF (Science and Engineering Services, Inc.), после которого выходная энергия в импульсе составляет 0,1–0,3 мДж при частоте следования 500 Гц. В состав лидара входит телескоп (по схеме Ньютона, зеркало диаметром 0,4 м), принимающий лидарные сигналы на длинах волн 280–310 нм. LMOL ведет измерения озона в высотном диапазоне от 0,5 до 4 км. Данные лидара записываются в сегментах по 20 с.

Современная мобильная система TOPAZ (Tunable Optical Profiler for Aerosol and Ozone) [6] представляет собой трехволновую лидарную систему, установленную на борту самолета. Она построена на Nd:YLF-лазере накачки для Ce:LiCAF-лазера с длинами волн зондирования 283–310 нм, выходной энергией импульса 0,1 мДж и частотой следования 1 кГц. В состав лидара входит телескоп (по схеме Ньютона, диаметр приемного зеркала 0,5 м). TOPAZ позволяет получать профили озона и аэрозолей начиная с ~400 м ниже воздушного судна и до приземного слоя (полеты обычно выполняются на высотах от 3 до 5 км н. у. м.). Пространственное разрешение лидарных сигналов соответствует 90 м. Данные TOPAZ записываются в сегментах по 10 с. Существует наземный мобильный вариант лидарной системы TOPAZ с аналогичными самолетной системе характеристиками [7, 8].

В режиме готовности функционирует система AMOLITE (Autonomous Mobile Ozone Lidar Instrument for Tropospheric Experiments) [9]. Nd:YAG-лазеры фирмы Continuum Inlite III работают на частоте 20 Гц с выходной энергией излучения 45 мДж. Лазер накачивает ВКР-ячейку с CO₂. Для лидара выбрана дифференциальная пара 287 и 299 нм. Телескоп (по схеме Ньютона, с зеркалом диаметром 0,35 м) обеспечивает прием лидарных сигналов в диапазоне высот 0,4–15 км ночью каждые 5 мин.

Лидарная система, установленная на борту самолета (Langley Research Center airborne ozone lidar) [10], использует Nd:YAG-лазер (Lasers Continuum Model ND 6000 flashlamp-pumped Nd:YAG, Model 9030 dye lasers) с длинами волн 290/300 нм, энергией в импульсе 30 мДж и частотой следования импульсов 30 Гц. В лидарную систему входят два телескопа Кассегрена с зеркалами диаметром 0,35 м, работающие в зенит и надир. Охватываемый высотный диапазон — от приземного слоя до 15 км.

SSRL-лидар (solid-state-Raman-laser) создан китайскими учеными [11]. На основе Nd:YAG-лазера на 532 нм, который накачивает кристалл SrWO₄, получают видимые длины волн 560 и 590 нм. Используя генератор второй гармоники, мобильная лидарная система обеспечивает выходное излучение УФ-лазера на длинах волн 280 и 295 нм с энергией 0,4 и 0,2 мДж. Лидар включает в себя телескоп, собранный по схеме Кассегрена, с зеркалом диаметром 0,2 м. SSRL-лидар охватывает высоты от 200 м до 3 км, его пространственное разрешение 75 м. Время, затраченное на одно измерение вертикального распределения озона, соответствует 1 мин. Все перечисленные мобильные лидарные системы перечислены в табл. 1.

Из приведенного выше обзора следует, что для создания современной компактной мобильной лидарной системы УФ-диапазона длин волн, способной обеспечивать решение задач мониторинга озона и аэрозоля в высотном диапазоне от приземного слоя до тропопаузы с высоким пространственным разрешением, малым временем измерений, перспективными являются твердотельные Nd:YAG-лазеры (266 нм) с диодной накачкой с частотой

Таблица 1

Основные технические характеристики мобильных лидаров

Название	Лазер	Длины волн, нм	ВКР-ячейка	Высотный диапазон, км	Приемное зеркало, м	Платформа	Время одного измерения, мин
TROPOZ [4]	Nd:YAG	289/299	H ₂ , D ₂	0,1–12	0,45 4 шт. 0,025	трейлер	0,3
LMOL [5]	Nd:YLF	280–310	—	0,5 до 4	0,4	трейлер	0,3
TOPAZ [6–8]	Nd:YLF	283–310	—	0,1–5	0,5	самолет, трейлер	0,2
AMOLITE [9]	Nd:YAG	287/299	CO ₂	0,4–15	0,35	трейлер	5
Langley Research Center airborne ozone lidar [10]	Nd:YAG	290/300	—	0,1–15	0,35	самолет	0,3
SSRL [11]	Nd:YAG	280/295	—	0,2–3	0,2	трейлер	1

следования импульсов 20 Гц и энергией в импульсе 20–30 мДж, а также телескопы Кассегрена с приемным зеркалом диаметром 0,3–0,5 м. Для современных мобильных лидаров обязательно наличие системы геопозиционирования.

Целью настоящей работы является разработка и запуск мобильного озонового лидара в режиме регулярных наблюдений на базе измерительного комплекса Сибирской лидарной станции (СЛС) в Томске. Лидар позволит охватить высотный диапазон от 0,1 до 12 км и тем самым закроет не охваченные СЛС высоты измерения озона [12].

Описание лидара, конструкция, принцип работы

На основе накопленного опыта обслуживания и модернизации измерительного комплекса СЛС и для исследования особенностей вертикального распределения озона от 0,1 км до высот тропопаузы, а также отслеживания сезонной изменчивости разработан и введен в эксплуатацию мобильный лидар. На рис. 1 представлена его блок-схема. Лидар предназначен для исследования озонового слоя методом дифференциального поглощения и рассеяния, а также для изучения аэрозольных полей с помощью однократного упругого рассеяния. В лидаре реализована коаксиальная схема вывода лазерного излучения в атмосферу с использованием пяти-

кратного зеркального коллиматора. Лидар построен на основе Nd:YAG-лазера QX500 фирмы SOLAR и приемного телескопа системы Кассегрена с зеркалом диаметром 0,35 м и фокусным расстоянием 0,7 м. В лидаре используется четвертая гармоника (266 нм) излучения лазерного источника; после прохождения через ВКР-ячейку с водородом (2 атм) преобразуется в пару длин волн 299 и 341 нм. Необходимая для получения эффекта ВКР плотность мощности накачки обеспечивается линзой с фокусным расстоянием 0,52 м.

Ячейка представляет собой трубу из нержавеющей стали внутренним диаметром 0,03 м и длиной 1,04 м, оборудованную линзами в качестве входных и выходных окон, выполненных из материала КУ-1. Энергия импульса накачки на длине волны 266 нм составляет 25 мДж. Далее на длинах волн 299 и 341 нм, отражаясь от поворотного зеркала, лазерное излучение попадает в зеркальный коллиматор, который расширяет луч в пять раз, тем самым уменьшая расходимость до 0,2 мрад. После зеркального коллиматора с помощью поворотных зеркал излучение направляется в атмосферу. Поворотное зеркало расположено над контрзеркалом телескопа, построенного по схеме Кассегрена. Собранный коаксиальный вывод лазерного излучения в атмосферу позволяет получить нулевую базу лидара с учетом теневой зоны 100 м.

Принятый телескопом оптический сигнал обратного рассеяния из атмосферы собирается в фокусе

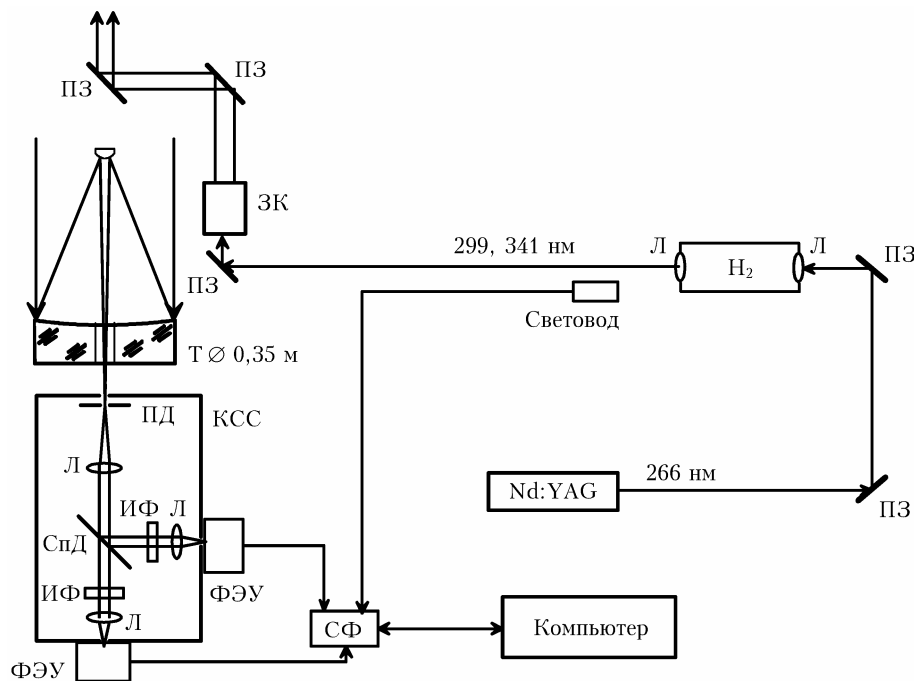


Рис. 1. Блок-схема мобильного озонового лидара: Nd:YAG — твердотельный лазер; H₂ — ВКР-ячейка с водородом, оборудованная линзами; ПЗ — поворотные зеркала; ЗК — зеркальный коллиматор; Т — приемный телескоп, собранный по схеме Кассегрена, с главным зеркалом диаметром 0,35 м; КСС — кювета спектральной селекции, оборудованная линзами; ПД — поляризатор; Л — линзы; СПД — спектроделительное зеркало; ИФ — интерференционные фильтры; ФЭУ — модули фотоэлектронных умножителей H12386-210 HAMAMATSU; СФ — счетчик фотонов PHCOUNT_4E; световод — световод для запуска счетчика фотонов; компьютер — персональный компьютер для сбора и хранения получаемой информации

главного приемного зеркала и передается через полевую диафрагму дальше. После полевой диафрагмы диаметром 1 мм оптический сигнал поступает в кювету спектральной селекции, где, проходя линзу, коллимируется. Параллельное излучение попадает на дихроичное зеркало, где происходит селекция по длинам волн. Излучение на длине волны 299 нм отражается, а на 341 нм пропускается. После дихроичного зеркала излучение проходит через узкополосные интерференционные фильтры для 299 и 341 нм, а затем фокусируется линзами на фотокатод модулей фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) H12386-210 фирмы HAMAMATSU на соответствующей длине волн.

Модули ФЭУ служат для преобразования оптического сигнала в электрический сигнал. Электрические сигналы с модулей ФЭУ по коаксиальным кабелям поступают на автономный счетчик фотонов PHCOUNT_4E [13] в регистрирующем тракте ли-

дара, где происходит суммирование оцифрованных сигналов по 16384 временным интервалам с разрешением 10 нм (1,5 м). Автономный счетчик фотонов PHCOUNT_4E работает как веб-сервер, доступ к которому можно получить с любого подключенного к Интернету компьютера, введя IP-адрес в веб-браузере. PHCOUNT_4E можно подключить к сети либо с помощью сетевого кабеля, либо через Wi-Fi. Для синхронизации работы счетчика фотонов с импульсным Nd:YAG-лазером используется оптический световод, который установлен после ВКР-ячейки. Все элементы лидара жестко закреплены и не требуют юстировки после транспортировки лидара, однако такая возможность предусмотрена. Лидарная система находится в защитном корпусе для транспортировки и установки его в передвижном фургоне (рис. 2).

Основные технические характеристики мобильного лидара представлены в табл. 2.

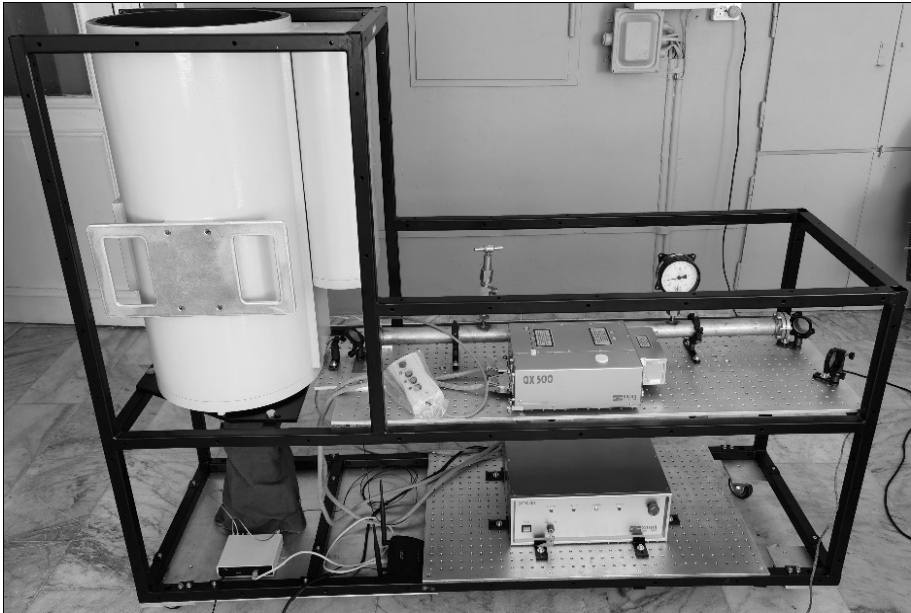


Рис. 2. Корпус разработанной мобильной лидарной системы

Таблица 2

Основные технические характеристики лидара

Параметр	Значение
1	2
<i>Передатчик</i>	
Лазер	SOLAR QX 500 Nd:YAG
Длина волны излучения, λ нм	266
Энергия импульса, мДж	~ 25
Система охлаждения лазера	Воздушная
Длина волны зондирования, λ нм	299/341
Частота следования импульсов	20/20
Энергия импульса выходного излучения, мДж	~ 8
Давление в ВКР-ячейке с водородом, атм	2
Длительность импульса, нс	10
Зеркальный коллиматор	Пятикратный (× 5)
Расходимость, мрад	0,2

1	2
<i>Приемник</i>	
Телескоп	Система Кассегрена
Диаметр зеркала, м	0,35
Фокусное расстояние, м	0,7
Счетчик фотонов	PHCOUNT_4E
Каналы приема, шт.	4
Скорость счета, МГц на канал	200
Входной импеданс, Ом	50
Синхронизация	Transistor Transistor Logic сигнал с частотой до 10 кГц либо оптический сигнал
Память на канал, Кб	16
Встроенная память для хранения результатов измерений	SD-карта 128 Гб
Интерфейс связи с персональным компьютером	Ethernet, Wi-Fi
ФЭУ	HAMAMATSU H12386-210, 2 шт.
<i>Общие характеристики</i>	
Пространственное разрешение, м	1,5–150
Высотный диапазон, км	~ 0,1–12
Габариты: высота × длина × ширина, мм	520 × 1700 × 1350
Вес, кг	~ 120
Электропитание	220 В, 50/60 Гц, ≤ 500 Вт
Температура эксплуатации, °C	5–50

Тестирование лидара

Мобильный озоновый лидар прошел все пусконаладочные работы и включен в состав измерительного комплекса СЛС. Описанная конфигурация мобильного лидара получила защиту Роспатента как полезная модель [14]. Первые натурные эксперименты подтвердили заявленные характеристики лидара, а именно охват высот 0,1–12 км (рис. 3). Натурный эксперимент проводился в безоблачный день в ночное время, в режиме счета фотонов лидарные сигналы получены с пространственным разрешением 50 м за 5 мин. Выполнено лидарное зондирование атмосферы, результаты измерений

записаны в файл. Анализ результатов зондирования показал, что необходимо ослабление каналов регистрации лидарных сигналов.

Из рис. 3, *а* видно, что облака были зарегистрированы на высоте 2 км, а лидарный сигнал становится информативным только с 1 км, поэтому, чтобы устранить насыщение лидарных сигналов в нижней части трассы зондирования, мы воспользовались мелкочечной сеткой с шагом ~ 0,2 мм. Результат применения такой модификации оптических каналов регистрации представлен на рис. 3, *б*.

Анализ сопоставления восстановленного профиля озона с данными спутника MetOp и модели Крюгера [15] на рис. 4 показал, что в измерениях

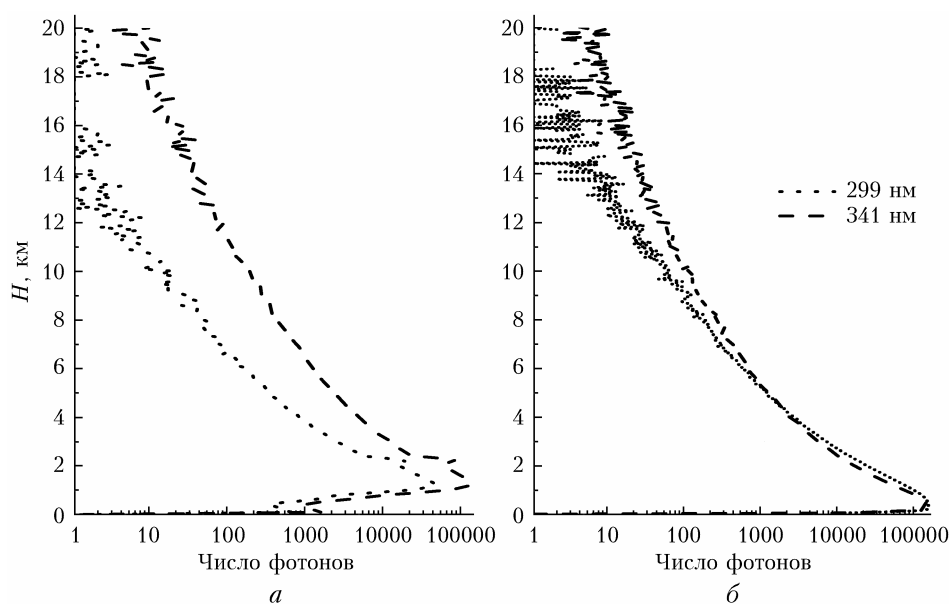


Рис. 3. Зарегистрированные лидарные сигналы: *а* — до, *б* — после настройки каналов регистрации. 27.04.2022 г.

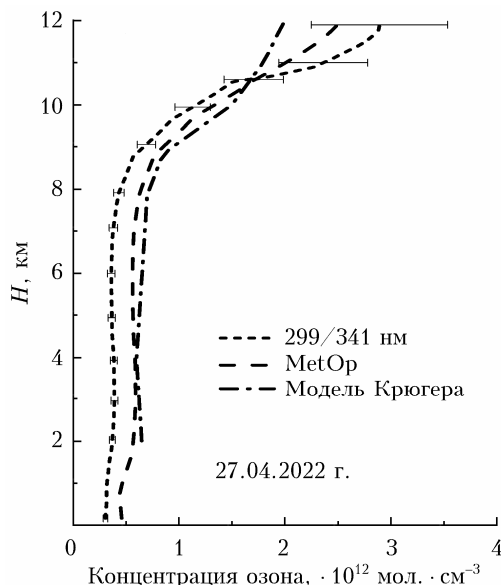


Рис. 4. Восстановленный профиль озона в сопоставлении с данными спутника MetOp и моделью Крюгера

спутника прослеживается значительное завышение концентрации озона по сравнению с профилем мобильного лидара на высотах от 0,1 до 9 км, где разница между профилями достигает $0,21 \cdot 10^{12}$ мол. $\cdot$ см $^{-3}$. Выполнен расчет погрешности восстановления профиля по формулам из работы [16], результаты которого представлены на рис. 4 в виде коридора отклонений.

Заключение

Для решения задач экспедиционных кампаний создан и введен в эксплуатацию мобильный озоновый лидар, работающий на длинах волн зондирования 299 и 341 нм, с охватом высот 0,1–12 км и пространственным разрешением лидарных сигналов от 1,5 до 150 м. По техническим параметрам и возможностям лидар конкурирует с современными зарубежными лидарными системами. Результаты натурных экспериментов подтверждают эффективность работы лидара. Приведенный пример восстановленного тропосферного профиля озона доказывает информативность данных зондирования атмосферы мобильным лидаром. Созданный мобильный лидар — единственный в России.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант № 21-79-10051).

Список литературы

- Белан Б.Д. Тропосферный озон. 1. Свойства и роль в природных и техногенных процессах // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 299–322.
- Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
- Leblanc T., Brewer M.A., Wang P.S., Granados-Muñoz M.J., Strawbridge K.B., Travis M., Firanski B., Sullivan J.T., McGee T.J., Sunnicht G.K., Twigg L.W.,

- Berkoff T.A., Carrion W., Gronoff G., Aknan A., Chen G., Alvarez R.J., Langford A.O., Senff C.J., Kirgis G., Johnson M.S., Kuang Shi, Newchurch M.J. Validation of the TOLNet lidars: The Southern California Ozone Observation Project (SCOOP) // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11, N 11. P. 6137–6162.
- Sullivan J.T., McGee T.J., Sunnicht G.K., Twigg L.W., Hoff R.M. A mobile differential absorption lidar to measure sub-hourly fluctuation of tropospheric ozone profiles in the Baltimore–Washington, D.C. region // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 10. P. 3529–3548.
- De Young R., Carrion W., Ganoe R., Pliutau D., Gronoff G., Berkoff T., Kuang Sh. Langley mobile ozone lidar: Ozone and aerosol atmospheric profiling for air quality research // Appl. Opt. 2017. V. 56, N 3. P. 721–730.
- Alvarez R.J., Senff C.J., Langford A.O., Weickmann A.M., Law D.C., Machol J.L., Merritt D.A., Marchbanks R.D., Sandberg S.P., Brewer W.A., Hardesty R.M., Banta R.M. Development and application of a compact, tunable, solid-state airborne ozone lidar system for boundary layer profiling // J. Atmos. Ocean. Technol. 2011. V. 28, N 10. P. 1258–1272.
- Wang L., Newchurch M., Alvarez R., Berkoff T., Brown S., Carrion W., De Young R., Johnson B., Ganoe R., Gronoff G., Kirgis G., Kuang S., Langford A., Leblanc T., McDuffie E., McGee T., Pliutau D., Senff C., Sullivan J., Sunnicht G., Twigg L., Weinheimer A. Quantifying TOLNet ozone lidar accuracy during the 2014 DISCOVER-AQ and FRAPPÉ campaigns // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10, N 10. P. 3865–3876.
- Alvarez R.J., Senff C.J., Weickmann A.M., Sandberg S.P., Langford A.O., Marchbanks R.D., Brewer W.A., Hardesty R.M. Reconfiguration of the NOAA TOPAZ lidar for ground-based measurement of ozone and aerosol backscatter // Proc. 26th Intern. Laser Radar Conf. 2012. P. 249–252.
- Strawbridge K.B., Travis M.S., Firanski B.J., Brook J.R., Staebler R., Leblanc T. A fully autonomous ozone, aerosol, and nighttime water vapor lidar: A synergistic approach to profiling the atmosphere in the Canadian oil sands region // Atmos. Meas. Tech. 2018. V. 11, N 12. P. 6735–6759.
- Browell E.V., Ismail S., Grant W.B. Differential absorption lidar (DIAL) measurements from air and space // Appl. Phys. B. 1998. V. 67, N 4. P. 399–410.
- Pan Liu, Tianshu Zhang, Xinhui Sun, Guangqiang Fan, Yan Xiang, Yibin Fu, Yunsheng Dong. Compact and movable ozone differential absorption lidar system based on an all-solid-state, tuning-free laser source // Opt. Express. 2020. V. 28, N 9. P. 13786–13800.
- Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Gridnev Yu.V., Kharchenko O.V. Measurements of ozone vertical profiles in the upper troposphere–stratosphere over Western Siberia by DIAL, MLS, and IASI // Atmosphere. 2020. V. 11, N 2. P. 196.
- Невzorov A.A., Невzorov A.B., Надеев A.И., Зайцев Н.Г., Романовский Я.О. Алгоритм управления счетчиком фотонов озонового лидара // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 5. С. 414–419; Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Nadeev A.I., Zaitsev N.G., Romanovskii Ya.O. Algorithm for control of an ozone lidar photon counter // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 5. P. 569–575.
- Пат. 215328. Россия, МПК G01W 1/02 (2006.01), СПК G01W 1/02 (2022.08) Невzorov A.A., Невzorov A.B., Романовский Я.О.; заявитель и патентообладатель

- ИОА СО РАН (RU). № 2022127769; Заявл. 11.11.2022; Опубл. 08.12.2022. Бюл. № 34.
15. *Krueger A.J., Minzner R.A.* Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. standard atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81, N D24. P. 4477.
16. *Neuzorov A.A., Neuzorov A.V., Makeev A.P., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V.* Estimation of the spatial resolution influence on the retrieval error of ozone profiles at the Siberian lidar station // *Proc. SPIE.* 2021. V. 11916. P. 119163H.

A.A. Neuzorov, A.V. Neuzorov, N.S. Kravtsova, O.V. Kharchenko, Ya.O. Romanovskii. **Mobile lidar for sounding tropospheric ozone.**

A mobile ozone lidar for sounding at wavelengths of 299 and 341 nm was designed and put into operation. The lidar is capable of covering the altitude range from 0.1 to 12 km with a spatial resolution of lidar signals from 1.5 to 150 m. The specification of the mobile lidar is given; the results of a field experiment on laser sounding of the atmosphere in Tomsk are presented. Echo signals received and the ozone profiles retrieved confirm the information content of lidar measurements in the troposphere. The results of lidar and satellite (MetOp) measurements are compared.