

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 004.41; 551.510.4; 551.510.534

# Алгоритм управления счетчиком фотонов озонового лидара

А.А. Невзоров<sup>✉</sup>, А.В. Невзоров, А.И. Надеев,  
Н.Г. Зайцев, Я.О. Романовский\*

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

Поступила в редакцию 4.04.2022 г.;  
после доработки 11.04.2022 г.;  
принята к печати 12.04.2022 г.

Разработан алгоритм и на его основе создан программный продукт для управления счетчиком фотонов и записи данных системы регистрации приемного тракта лидара на длинах волн 299/341 нм при зондировании атмосферы с пространственным разрешением от 1,5 до 150 м. Основные функции программы: проверка подключения устройства; прием данных лидарного зондирования; оцифровка данных; графический вывод на экран; запись данных в файл; преобразование формата файла .dat в .txt. Выполнена экспериментальная проверка программного продукта совместно с приемным узлом мобильного озонового лидара, который был внедрен в программно-аппаратную часть измерительного комплекса Сибирской лидарной станции. В состав приемного узла мобильного озонового лидара входят счетчик фотонов PHCOUNT\_4E и фотоэлектронные умножители H12386-210 фирмы Hamamatsu. Приведены данные лидарного зондирования атмосферы и пример профиля концентрации озона, восстановленного из лидарных данных за февраль в 2022 г.

*Ключевые слова:* программа, лидарное зондирование, озон, счетчик фотонов, обработка данных; program, lidar sensing, ozone, photon counter, data processing.

## Введение

В настоящее время актуальны вопросы технологии контроля состояния озонового слоя атмосферы. Озон регенерируется из молекулярного кислорода посредством присоединения к его молекуле атомарного кислорода под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца. При этом примерно 85% озоносферы расположено на высотах стратосферы от 15 до 45 км. Стратосферный озон защищает все живое на Земле от пагубного УФ-излучения Солнца. Процесс образования и разрушения стратосферного озона может легко нарушаться под воздействием антропогенных факторов и извержений вулканов. Для мониторинга озоносферы созданы сети лидарных станций, которые контролируют изменения озонового слоя и вариации газовых составляющих озоновых циклов [1]. Наиболее значимые из них: Столовая гора (ТМГ) (34,4° с.ш., 117,7° з.д.), США [2, 3]; Обсерватория Верхнего Прованса (ОНП) (43,94° с.ш., 5,71° в.д.), Франция [4, 5]; Сибирская лидарная станция (СЛС) (56,50° с.ш., 85,00° в.д.), Россия [6, 7];

Обсерватория Yangbajing (30°5' с.ш., 90°33' в.д.), Китай [8]; Обсерватория Мауна-Лоа (MLO) (19,53° с.ш., 155,57° з.д.), США [9]; Центр космических полетов Годдарда (GSFC) (37,1° с.ш., 76,39° з.д.), США [10].

Первые лидарные системы в составе измерительных станций были наземными и стационарными, однако с развитием элементной базы стал возможным следующий шаг развития исследовательских лидарных станций – перенос лидарных систем на мобильные платформы: самолеты, трейлеры, автомобили [10–17].

Одна из важнейших составляющих любой лидарной системы – приемный узел: счетчик фотонов и фотоэлектронные умножители. Неотъемлемым элементом систем дистанционного контроля состояния окружающей среды является программа управления и обработки данных, получаемых с использованием различного оборудования в рамках одной лидарной системы. Так, на СЛС действует программно-аппаратный комплекс приема и обработки данных [18]. При разработке новых лидарных технологий и систем необходимо создавать оригинальные алгоритмы и программы для управления основными элементами лидара и обработки полученной информации.

Цель настоящей работы – разработка алгоритма и программы для управления счетчиком фотонов PHCOUNT\_4E и экспериментальная проверка их функциональности на базе измерительного комплекса СЛС.

\* Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Александр Иванович Надеев (nadeev@iao.ru); Николай Геннадьевич Зайцев (ZaicevNG@iao.ru); Ярослав Олегович Романовский (romanovskii.io17@physics.msu.ru).

## Лидарный комплекс

На рис. 1 представлена блок-схема лидарного комплекса для зондирования озона в верхней тропосфере – стратосфере [19]. Для исследования особенностей вертикального распределения озона (ВРО) в верхней тропосфере – стратосфере, особенно в области вокруг тропопаузы, и отслеживания его сезонной изменчивости лидарный комплекс работает в режиме регулярных измерений на длинах волн  $\lambda = 299/341$  и  $308/353$  нм. Чередующееся лидарное зондирование стратосферы и тропосферы позволяет охватить в наиболее удачных измерениях диапазон высот  $\sim 5\text{--}20$  и  $\sim 15\text{--}45$  км.

Основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов лидарной системы представлены в таблице.

Основные технические характеристики лидарного комплекса

Передатчик	Nd:YAG	XeCl
Длина волны зондирования, $\lambda$ нм	299 341	308 353
Энергия импульса, мДж (соотв. $\lambda$ )	25 20	100 50
Частота следования, Гц (соотв. $\lambda$ )	15	100
Расходимость, мрад	0,1–0,3	0,1–0,3
Приемник	Ньютоновский телескоп	
Диаметр зеркала, м	0,5	
Фокусное расстояние, м	1,5	

В качестве первого источника излучения лидарной системы для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере используется Nd:YAG-лазер – модель LS-2134UT Минской фирмы LOTIS ТП, работающий на  $\lambda = 266$  нм. Вторым источником излучения для стратосферных измерений является эксимерный XeCl-лазер LPX-120i фирмы Lambda Physik, работающий на  $\lambda = 308$  нм. Излучение лазеров, проходя через ячейку вынужденного комбинационного рассеяния с водородом, попадает на автоматизированные поворотные зеркала,

которые управляются компьютером, и выводится в атмосферу. Прием оптических сигналов ведется на телескоп с зеркалом диаметром 0,5 м. После телескопа оптическое излучение попадает в кювету спектральной селекции, где происходит селекция длин волн зондирования.

Для лидарного комплекса нами был разработан приемный узел мобильного озонного лидара, в состав которого входят счетчик фотонов PHCOUNT\_4E (рис. 2) и ФЭУ H12386-210 фирмы Hamamatsu, работающие в режиме счета импульсов фототока.

Счетчик фотонов имеет четыре канала приема данных и позволяет производить запись лидарных сигналов с пространственным разрешением от 1,5 до 150 м. Время измерения озона на паре длин волн 299/341 нм составляет до  $\sim 5$  мин. PHCOUNT\_4E работает как сервер, доступ к которому можно получить с любого компьютера, введя IP-адрес и номер порта при подключении к сети с помощью сетевого кабеля, либо через Wi-Fi. На поставляемой с прибором карте Secure Digital (SD) содержится все необходимое программное обеспечение. Прикладное программное обеспечение, выступающее как клиент для сервера PHCOUNT\_4E, создает соединения для передачи команд (запросов) на сервер, приема данных с сервера и управляющее соединение.

Технические характеристики счетчика фотонов приведены ниже.

Число каналов	4 счетных канала, 4 канала фиксации перегрузки ФЭУ
Скорость счета	200 МГц на канал
Входной импеданс	50 Ом
Память на канал	16 Кб
Память для сбора и хранения данных	SD-карта 128 Гб
Пространственное разрешение	1,5–150 м
Питание	12 В, 2 А
Габариты	137 × 120 × 40 мм

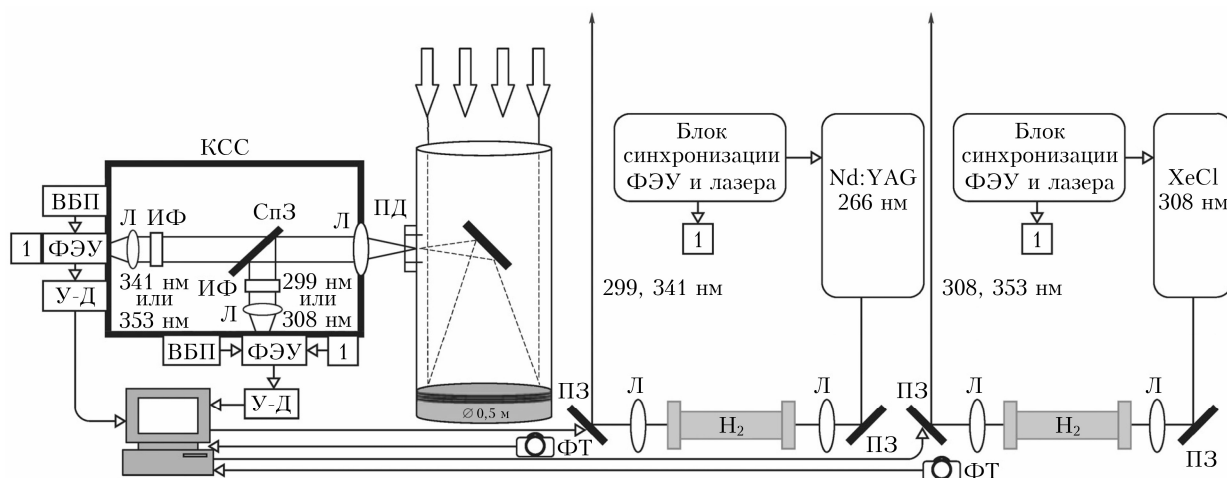


Рис. 1. Блок-схема озонного лидара: ПД – полевая диафрагма; КСС – кювета спектральной селекции с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ); СпЗ – спектроразделительное зеркало; У-Д – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; ПЗ – поворотные зеркала; Л – линзы; ИФ – интерференционные фильтры; ФТ – фототранзистор; 1 – сигнал управления блоками ФЭУ; Н<sub>2</sub> – ячейка вынужденного комбинационного рассеяния с водородом

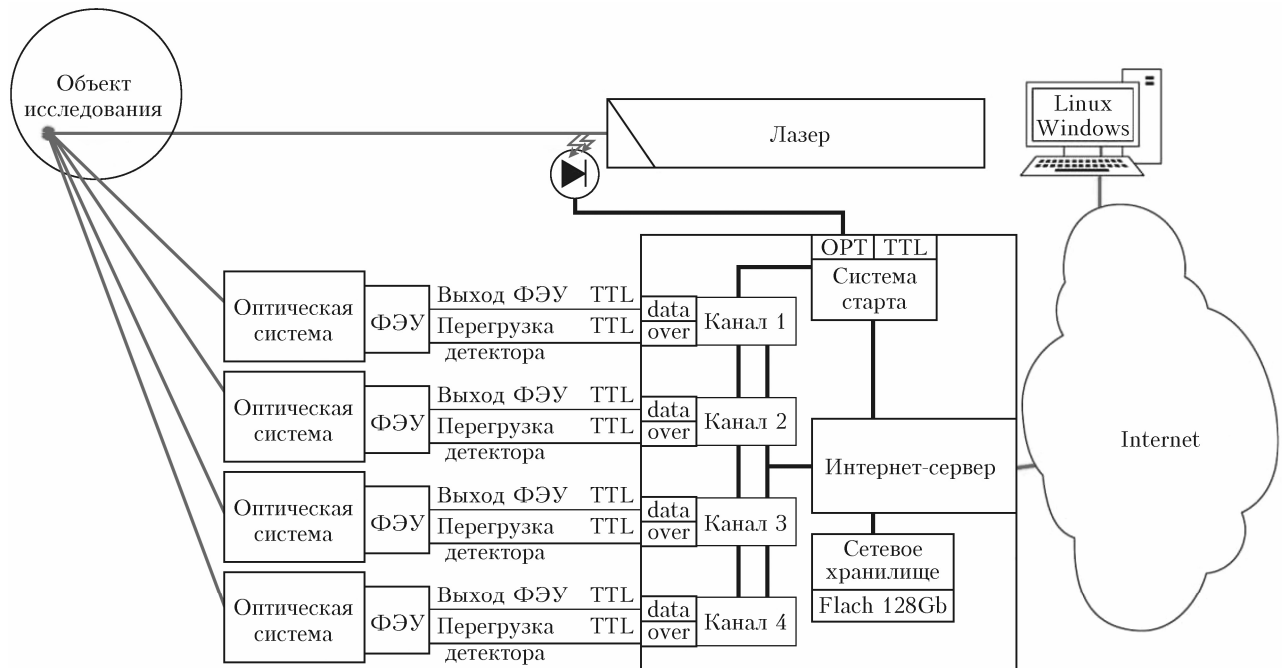


Рис. 2. Структура счетчика фотонов RHCOUNT\_4E: OPT – оптический вход; TTL – TTL-вход (transistor-transistor logic)

### Алгоритм и программа управления счетчиком фотонов

Для управления счетчиком фотонов RHCOUNT\_4E мы разработали алгоритм, который выполняется в несколько последовательных этапов. Первый этап – запуск исполняемого файла или начало работы программы. Второй этап – настройка параметров счетчика фотонов, где пользователь задает пространственное разрешение, время одного измерения, количество файлов, выбирает систему старта и отсрочку запуска. Третий этап заключается в проверке подключения счетчика фотонов к компьютеру. Для этого необходимо указать IP-адрес и порт счетчика. Если подключение отсутствует, то всплывающее окно извещает об ошибке. Четвертый этап работы алгоритма – это непосредственный старт накопления данных, где происходит распознавание каналов поступления данных из счетчика фотонов. На предпоследнем этапе алгоритм реализует цикл «Оцифровка данных» с условием его остановки по команде оператора (кнопка «СТОП») либо при достижении заданных параметров, установленных на втором этапе. Функции цикла: отображение данных лидарного зондирования на экране монитора в режиме реального времени; запись данных лидарного зондирования в файл. Алгоритм автоматически преобразует данные, поступающие со счетчика фотонов в теле цикла «Оцифровка данных», в численную десятичную форму. Результат работы алгоритма представляет собой файл формата .dat (файл зарегистрированных лидарных эхо-сигналов).

Блок-схема разработанного алгоритма показана на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления счетчиком фотонов RHCOUNT\_4E

На основе представленного алгоритма был разработан программный продукт для управления счетчиком фотонов RHCOUNT\_4E. Программа представлена в виде исполняемого файла «RHCOUNT\_4E.exe». Программное обеспечение, необходимое для функционирования программного комплекса, – операционная система (ОС) Windows Vista/7/8/10. Минимальные системные требования

для запуска: CPU 32/64bit 2.4 GHz; ОЗУ 4 ГБ. Исходный текст программного комплекса подготовлен с использованием языка программирования C++ в среде разработки Visual Studio 2017.

Для старта работы оператору необходимо нажать кнопку «СТАРТ». После запуска счетчика фотонов в автоматическом режиме производится запись данных лидарного зондирования в файлы формата .dat. Это необходимо для повышения быстродействия процедуры записи. После нажатия на кнопку «СТОП» работа программы прекращается. Интерфейс программы представлен на рис. 4.

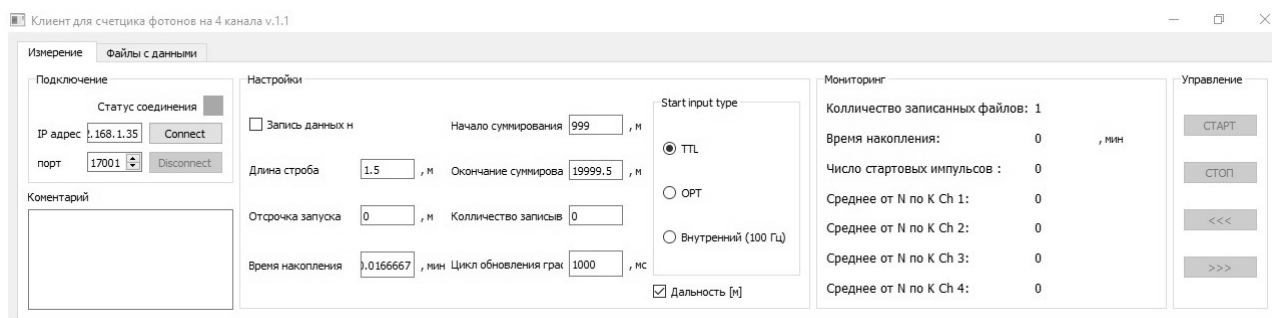


Рис. 4. Интерфейс программы записи данных и управления счетчиком фотонов

Во вкладке «Измерения» на рис. 4 видно, что оператору предоставляется возможность установить IP-адрес и порт для подключения счетчика. Соединение устанавливается включением опции «Connect», которая обозначается зеленым квадратом при успешном подключении к счетчику фотонов. Условия текущего измерения задаются следующими параметрами:

- 1) управление состоянием соединения («Connect», «Disconnect»);
- 2) длина пространственного разрешения (строба) в метрах или наносекундах в зависимости от выбранной единицы измерения;
- 3) отсрочка запуска в метрах или наносекундах;
- 4) время накопления файла в секундах;
- 5) начало и конец суммирования для оценки фона;
- 6) запись заданного количества файлов на SD-карту;
- 7) время обновления графиков при просмотре в режиме осциллографа;
- 8) выбор синхронизации: TTL или оптоволокно.

Во время измерений в реальном времени отображается текущая информация: количество сохраненных файлов, время накопления, число принятых импульсов старта и сумма сигналов в выделенных стробах для каждого канала. Результаты измерения демонстрируются в графической области, выделенной для построения графиков. Графики доступны для просмотра в линейном, логарифмическом и скорректированном на квадрат высоты масштабах. В интерфейсе программы предусмотрен визуальный идентификатор обозначения каналов записи данных

различными цветами: зеленый, синий, красный, черный.

Выбранные оператором файлы с результатами зондирования озона формата .dat автоматически преобразуются в файлы .txt в теле цикла «Преобразование формата». Блок-схема алгоритма преобразования формата .dat в .txt показана на рис. 5.

На вкладке программы «Файлы с данными» предлагается выбор файлов, сохраненных в формате .dat на SD-карте счетчика фотонов, и преобразование их в формат .txt для просмотра в графических редакторах и последующей обработки на компьютере.

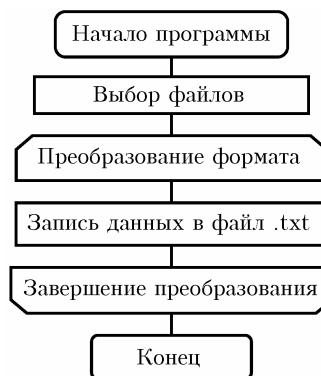


Рис. 5. Блок-схема программы для преобразования формата .dat в .txt

## Результаты лидарных измерений

После установки на измерительный комплекс СЛС программно-аппаратного приемного узла выполнен ряд измерений. В состав приемного узла входят: счетчик фотонов PHCOUNT\_4E, модули ФЭУ и созданная на основе разработанного алгоритма программа. На рис. 6 приведены зарегистрированные лидарные сигналы на паре  $\lambda = 299/341$  нм с использованием ранее применяемых в режиме регулярного мониторинга озоносферы ФЭУ R7207-01 совместно с усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы Hamamatsu [19] и ФЭУ H12386-210 той же фирмы. Для восстановления ВРО применялся метод дифференциального поглощения и рассеяния [20]. Восстановленные профили ВРО представлены в сравнении с моделью Крюгера [21].

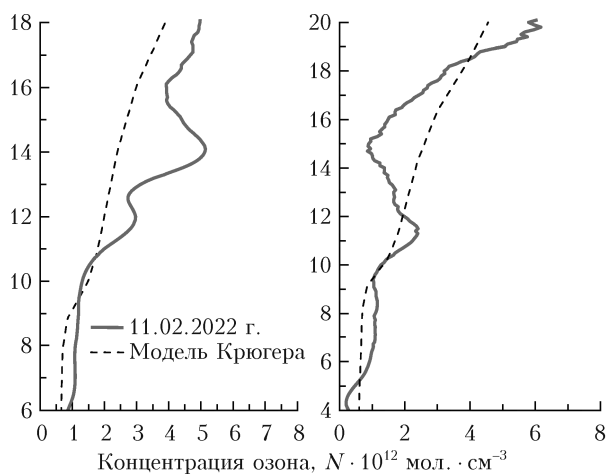
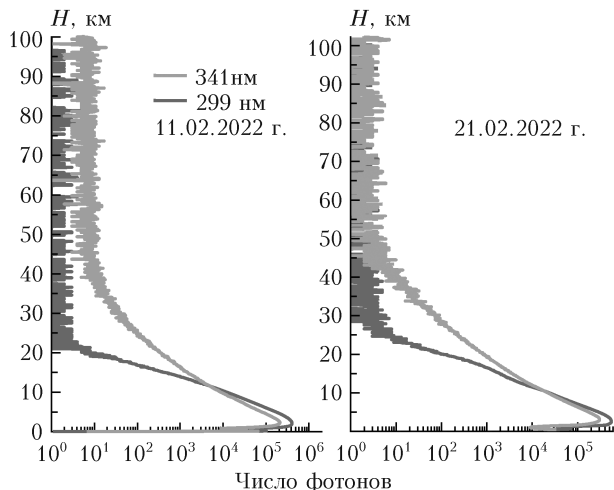


Рис. 6. Зарегистрированные лидарные сигналы на паре длин волн 299/341 нм и восстановленные из них профили ВРО с использованием: ФЭУ R7207-01 совместно с усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы Hamamatsu (слева); модулей ФЭУ Н12386-210 той же фирмы (справа)

Из рис. 6 видно, что новые модули ФЭУ Н12386-210 позволили увеличить дальность регистрации обратных лидарных сигналов практически на 10 км. Дальность регистрации лидарных сигналов на длине волны 299 нм составляет 21 км при использовании ФЭУ R7207 совместно с усилителями-дискриминаторами С3866 фирмы Hamamatsu и 31 км с модулями ФЭУ Н12386-210, а на длине волны 341 нм — 40 и 51 км соответственно. Кроме этого, новые фотоприемники имеют существенно меньший темновой шум, чем использованные ранее ФЭУ R7207-01. Профиль ВРО, восстановленный из сигналов лидара 21 февраля 2022 г., показывает, что высотный диапазон восстановления расширен на 2 км вверх и вниз по сравнению с измерениями 11 февраля 2022 г., когда профиль ВРО удалось уверенно восстановить в диапазоне высот 6–18 км.

Полученные результаты экспериментальной проверки позволяют говорить о перспективности использования на озоновом лидаре ФЭУ Н12386-210 и счетчика фотонов PHCOUNT\_4E совместно с разработанным программным продуктом.

## Заключение

Представлен алгоритм и выполненный на его основе программный продукт для управления счетчиком фотонов PHCOUNT\_4E в составе приемного узла для озонового лидара. На примере зондирования озона на СЛС ИОА СО РАН показаны возможности программного продукта: проверка подключения устройства; прием данных лидарного зондирования; оцифровка данных; графический вывод на экран; запись данных в файл; преобразование формата файла .dat в .txt.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 21-79-10051).

## Список литературы

1. Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Mazière M., Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levelt P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A.R.J., Veefkind J.P., Vigouroux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // Atmos. Meas. Tech. 2014. V. 7, N 5. P. 1395–1427.
2. McDermid I.S., Godin S.M., Lindquist L.O. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone // Appl. Opt. 1990. V. 29, N 25. P. 3603–3612.
3. McDermid I.S., Beyerle G., Haner D.A., Leblanc T. Redesign and improved performance of the tropospheric ozone lidar at the Jet Propulsion Laboratory Table Mountain Facility // Appl. Opt. 2002. V. 41, N 36. P. 7550–7555.
4. Godin-Beekmann S., Songa T., Heese B. Long-term DIAL monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution // Proc. SPIE. 2003. V. 4893. P. 251–263.
5. Gaudel A., Ancellet G., Godin-Beekmann S. Analysis of 20 years of tropospheric ozone vertical profiles by lidar and ECC at Observatoire de Haute Provence (OHP) at 44°N, 6.7°E // Atmos. Environ. 2015. V. 113. P. 78–89.
6. 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.
7. Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Intercomparison of ozone vertical profile measurements by differential absorption lidar and IASI/MetOp satellite in the upper troposphere – lower stratosphere // Remote Sens. 2017. V. 9, N 5. P. 447.
8. Fang X., Li T., Ban C., Wu Z., Li J., Li F., Cen Y., Tian B. A mobile differential absorption lidar for simultaneous observations of tropospheric and stratospheric ozone over Tibet // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 4126–4139.

9. *Nair P.J., Godin-Beekmann S., Froidevaux L., Flynn L.E., Zawodny J.M., Russell J.M., Pazmico A., Ancellet G., Steinbrecht W., Claude H., Leblanc T., McDermid S., van Gijssel J.A.E., Johnson B., Thomas A., Hubert D., Lambert J.-C., Nakane H., Swart D.P.J.* Relative drifts and stability of satellite and ground-based stratospheric ozone profiles at NDACC lidar stations // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 6. P. 1301–1318.
10. *Sullivan J.T., McGee T.J., Summicht 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.
11. *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.
12. *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.
13. *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., Summicht 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.
14. *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. Porto Heli, Greece, 25–29 June 2012, P. 249–252.
15. *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.
16. *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.
17. *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.
18. *Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A.* Algorithm for retrieval of vertical distribution of ozone from DIAL laser remote measurements // *Opt. Memory Neural Networks (Information Optics).* 2015. V. 24, N 4. P. 295–302.
19. *Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V.* Lidar differential absorption system for measuring ozone in the upper troposphere – stratosphere // *J. Appl. Spectroscop.* 2019. V. 85, N 6. P. 1114–1120.
20. *Measures R.M.* *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications.* Malabar: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
21. *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.

**A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov, A.I. Nadeev, N.G. Zaitsev, Ya.O. Romanovskii. Algorithm for control of ozone lidar photon counter.**

An algorithm is developed and, on its basis, a software product is created to control the photon counter and to save the data from recording system of the lidar's receiving channel at wavelengths of 299/341 nm in atmospheric sensing with a spatial resolution from 1.5 to 150 m. The main software options are: device connection check; receiving lidar sensing data; data digitization; graphical displaying; data filing; conversion of .dat into .txt file format. The software product is experimentally tested along with the mobile ozone lidar receiver unit, incorporated into the software part of the measurement complex of the Siberian Lidar Station. The receiver unit of the mobile ozone lidar comprises a photon counter PHCOUNT\_4E and Hamamatsu photo-electronic multipliers H12386-210. We present the atmospheric lidar sensing data and an ozone concentration profile retrieved in 2022.