

## АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

А. А. Невзоров, А. В. Невзоров\*, **А. И. Надеев**, Н. Г. Зайцев,  
Я. О. Романовский, О. В. Харченко, Н. С. Кравцова

УДК 551.510.534; 551.507.321.2

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН  
Томск, Россия; e-mail: naa@iao.ru, nevzorov@iao.ru, zaicevNG@iao.ru,  
romanovskii.io17@physics.msu.ru, olya@iao.ru, kravtsova@iao.ru

(Поступила 1 декабря 2022)

Разработан и реализован алгоритм обработки данных лидарного зондирования на длинах волн 299/341 нм для вертикальной трассы зондирования атмосферы с пространственным разрешением 1.5—150 м. В состав программы входят основные функции: запись данных лидарного зондирования атмосферы, преобразование формата бинарного файла dat в текстовый txt, восстановление профилей концентрации озона. Разработанный на базе созданного алгоритма программный комплекс для обработки данных лидарного зондирования позволяет получать профили концентрации озона от 4 до 20 км. В блоках записи данных лидарного зондирования атмосферы и восстановления профилей концентрации озона предусмотрен визуальный контроль зарегистрированных эхо-сигналов и восстановленных профилей концентрации озона. Приведен пример восстановления профиля концентрации озона из лидарных данных.

**Ключевые слова:** программный комплекс, атмосфера, озоновый профиль.

The algorithm for processing lidar sensing data at wavelengths of 299/341 nm for a vertical atmospheric sensing trace with spatial resolution of 1.5—150 m has been developed and implemented. The program includes the main functions: recording the data of lidar sensing of the atmosphere, converting the dat binary file format to the text txt format, retrieval of ozone concentration profiles. The software package developed on the basis of the created algorithm for processing lidar sensing data allows one to obtain ozone concentration profiles from 4 to 20 km. The data recording units for lidar sensing of the atmosphere and retrieval of ozone concentration profiles provide visual monitoring of recorded echo signals and retrieved ozone concentration profiles. An example of retrieving the ozone concentration profile from lidar data is given.

**Keywords:** software package, atmosphere, ozone profile.

**Введение.** Малые газовые составляющие атмосферы (МГС), к которым относятся водяной пар, углекислый газ, озон, оксиды азота и серы, угарный газ и др., являются оптически активными компонентами атмосферы и оказывают большое влияние на процессы погодообразования, загрязнения воздушного бассейна индустриальными выбросами, трансформации солнечного излучения, распространения оптических волн. В связи с этим актуальна разработка приборов и методов анализа газового состава атмосферы, при этом наиболее интенсивно развиваются дистанционные методы [1], которые в отличие от стандартных контактных методов газоанализа обеспечивают возможность получения данных с высоким быстродействием и в значительных пространственных масштабах. Для решения данной задачи созданы сети лидарных станций, которые в кооперации контролируют изменения озонасферы и газовые составляющие озоновых циклов [2]. Известны действующие лидарные станции, измеряющие озон в тропосфере и стратосфере: Столовая гора (TMF) ( $34.4^{\circ}$  N,  $117.7^{\circ}$  W), США [3, 4];

---

**ALGORITHM FOR PROCESSING LIDAR SENSING DATA OF OZONE IN THE ATMOSPHERE**  
A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov\*, **A. I. Nadeev**, N. G. Zaitsev, Ya. O. Romanovskii, O. V. Kharchenko,  
N. S. Kravtsova (V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Russian Academy of Sciences, Tomsk,  
Russia; e-mail: naa@iao.ru, nevzorov@iao.ru, zaicevNG@iao.ru, romanovskii.io17@physics.msu.ru,  
olya@iao.ru, kravtsova@iao.ru)

обсерватория Верхнего Прованса (OHP) ( $43.94^{\circ}$  N,  $5.71^{\circ}$  E), Франция [5, 6]; Центр космических полетов Годдарда (GSFC) ( $37.1^{\circ}$  N,  $76.39^{\circ}$  W), США [7]; Сибирская лидарная станция (СЛС), г. Томск ( $56.50^{\circ}$  N,  $85.00^{\circ}$  E), Россия [8]; обсерватория Yangbajing ( $30^{\circ}5'$  N,  $90^{\circ}33'$  E), Китай [9]; обсерватория Мауна-Лоа (MLO) ( $19.53^{\circ}$  N,  $155.57^{\circ}$  W), США [10]. Сравнение технических характеристик лидарных систем приведено в [11]. Из-за технической сложности лидаров и их эксплуатации, а также погодных условий измерения проводятся по готовности. Помимо инструментальной части неотъемлемым элементом систем дистанционного контроля атмосферы является программный комплекс согласованного управления измерениями и обработки полученных данных в рамках одной лидарной системы. Поэтому важно повышение эффективности и информативности каждого измерения и применение последних программных и аппаратных средств обработки данных. Модернизация лидарной системы требует создания оригинального алгоритма и программы как в части регистрации лидарных сигналов, так и в обработке полученных данных измерений. Для улучшения технических характеристик лидара производят замену фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) и счетчика фотонов (СФ) на новые комплексы, вследствие чего появляется необходимость создания нового алгоритма и программы управления СФ.

Цель данной работы — разработка алгоритма и программного комплекса обработки данных зондирования озона на базе лидарного комплекса СЛС.

**Лидарный комплекс дифференциального поглощения озона.** Для исследования особенностей вертикального распределения концентрации озона (ВРО) в верхней тропосфере—стратосфере, особенно в районе тропопаузы, и отслеживания сезонной изменчивости лидарный комплекс работает в режиме регулярных измерений на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. Чередование лидарного зондирования стратосферы и тропосферы позволяет охватить в наиболее удачных измерениях диапазоны высот от  $\sim 5$  до  $\sim 20$  км и от  $\sim 15$  до  $\sim 45$  км [12]. Основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов лидарной системы представлены в табл. 1.

**Т а б л и ц а 1. Основные технические характеристики лидарного комплекса СЛС**

Передатчик	Nd:YAG		XeCl	
Длина волны зондирования, нм	299	341	308	353
Энергия импульса, мДж	25	20	100	50
Частота следования, Гц	15		100	
Расходимость, мрад	0.1—0.3		0.1—0.3	
Приемник	Телескоп Ньютона			
Диаметр зеркала, м	0.5			
Фокусное расстояние, м	1.5			

В качестве источников излучения лидарной системы для зондирования озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере используется Nd:YAG-лазер, модель LS-2134UT (Lotis ТП, Беларусь), работающий на  $\lambda = 266$  нм, для измерений стратосферного озона — эксимерный XeCl-лазер LPX-120i (Lambda Physik) на  $\lambda = 308$  нм. Проходя через ячейки вынужденного комбинационного рассеяния, излучения лазеров попадают на автоматизированные поворотные зеркала, которые управляются компьютером, и выводятся в атмосферу. Прием оптических сигналов ведется на телескоп с диаметром зеркала 0.5 м. Принятое телескопом из атмосферы обратно рассеянное излучение выделяется с помощью спектральной оптики по длинам волн зондирования и регистрируется ФЭУ. Для измерений озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере в лидарный комплекс включен разработанный приемный узел, в состав которого входит СФ PHCOUNT\_4E и приемные модули ФЭУ H12386-210 (Hamamatsu, Япония), работающие в режиме счета импульсов фототока и имеющие в своем составе канал перенасыщения ФЭУ. В связи с этим подключение модулей к СФ “PHcount6/2” технически не представляется возможным, поэтому данный приемный узел заменил работавшие ранее ФЭУ R7207-01 совместно с усилителями-дискриминаторами C3866 (Hamamatsu) и СФ PHcount6/2, который обеспечивал пространственное разрешение лидарных сигналов с 10 до 100 м. PHCOUNT\_4E имеет четыре канала приема данных, четыре канала перенасыщения ФЭУ и позволяет регистрировать лидарные сигналы с пространственным разрешением от 1.5 до 150 м. Время измерения озона на паре 299/341 нм составляет до  $\sim 5$  мин, 308/353 нм до 30 мин. PHCOUNT\_4E работает как сервер, доступ к которому можно получить с 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 необходимое программное обеспечение.

**Разработка алгоритма обработки данных лидарного зондирования.** Для функционирования лидарного комплекса в режиме регулярных измерений создан алгоритм программного комплекса для регистрации и обработки данных зондирования на основе метода дифференциального поглощения и рассеяния. После модернизации лидарного комплекса, в частности при замене СФ и ФЭУ, требуется разработка новых программ для управления СФ и обработки данных. Поэтому в состав алгоритма работы программного комплекса входят блоки записи данных лидарного зондирования атмосферы, преобразования формата файла dat в txt, восстановления профилей концентрации озона.

Исходные уравнения для расчета концентрации озона при дистанционном лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения (DIAL) имеют вид [13]:

$$N_{\text{on(off)}}(H) = c \left[ \beta_{\text{on(off)}}^{\text{a}}(H) + \beta_{\text{on(off)}}^{\text{m}}(H) \right] \exp \left[ -2 \int_0^H \alpha_{\text{on(off)}}^{\text{a}}(H) + \alpha_{\text{on(off)}}^{\text{m}} + k_{\text{on(off)}} n(H) \right], \quad (1)$$

где  $N(H)$  — эхо-сигнал, зарегистрированный на соответствующих длинах волн на линии поглощения (on) и вне линии поглощения (off);  $c$  — аппаратная постоянная;  $k$  — сечение поглощения озона;  $n(H)$  — концентрация озона;  $\alpha^{\text{m}}$  — коэффициент ослабления молекулярного рассеяния;  $\alpha^{\text{a}}$  — коэффициент ослабления аэрозольного рассеяния;  $\beta^{\text{a}}(H)$  — коэффициент обратного аэрозольного рассеяния;  $\beta^{\text{m}}(H)$  — коэффициент обратного молекулярного рассеяния.

Математически преобразуя отношение (1) двух лидарных сигналов, получаем концентрацию газа, распределенную вдоль исследуемой трассы зондирования [13]:

$$n(H) = \frac{1}{2[k_{\text{on}}(H) - k_{\text{off}}(H)]} \left\{ \underbrace{\frac{d}{dH} \left[ \ln \frac{N_{\text{off}}(H)}{N_{\text{on}}(H)} \right]}_A - \underbrace{\frac{d}{dH} \ln \left[ \frac{\beta_{\text{off}}^{\text{a}}(H) + \beta_{\text{off}}^{\text{m}}(H)}{\beta_{\text{on}}^{\text{a}}(H) + \beta_{\text{on}}^{\text{m}}(H)} \right]}_B - \underbrace{2 \left[ \frac{\alpha_{\text{off}}^{\text{a}}(H) - \alpha_{\text{on}}^{\text{a}}(H)}{D} \right]}_C \right\}, \quad (2)$$

где  $A$  — температурная коррекция сечений поглощений;  $B$  — основная часть DIAL-метода;  $C$  и  $D$  — аэрозольная коррекция.

Алгоритм программного комплекса в части восстановления профилей концентрации озона реализует выражение (2). При больших значениях аэрозольного наполнения атмосферы обратное аэрозольное рассеяние в несколько раз превышает молекулярное, что при неучтенных рассеивающих и ослабляющих свойствах атмосферы на зондирующих длинах волн дает существенные искажения восстановленного озонового профиля [14].

В качестве восстанавливаемого по эхо-сигналам параметра, по которому отслеживается вертикальное распределение аэрозоля, рассматривают отношение рассеяния  $R(H)$ , представляющее собой отношение суммарного коэффициента обратного рассеяния к молекулярному [13]:

$$R(H) = \frac{\beta(H)}{\beta^{\text{m}}(H)} = \frac{\beta^{\text{a}}(H) + \beta^{\text{m}}(H)}{\beta^{\text{m}}(H)} = 1 + \frac{\beta^{\text{a}}(H)}{\beta^{\text{m}}(H)}. \quad (3)$$

В алгоритме расчета аэрозольная коррекция учитывается в выражениях  $C$  и  $D$  введением реального распределения отношения рассеяния  $R_{\text{off}}(H)$ , в то время как в обычной “невозмущенной” атмосфере расчет ВРО можно проводить при  $R_{\text{off}}(H) = 1$ . Для восстановления отношения рассеяния  $R_{\text{off}}(H)$  обратимся к лидарному уравнению в приближении однократного упругого рассеяния [13]:

$$N(H) = c T^2(H) [\beta^{\text{a}}(H) + \beta^{\text{m}}(H)] H^{-2} + N_{\text{sum}}, \quad (4)$$

где  $H$  — высота, или в обобщенном случае расстояние;  $N(H)$  — зарегистрированный эхо-сигнал на высоте  $H$ ;  $c$  — аппаратная постоянная лидара, включающая в себя площадь приемного телескопа, пропускание приемопередающего тракта, энергию лазерного импульса, квантовую эффективность фотодетектора;  $T(H)$  — прозрачность слоя атмосферы от лидара до текущей высоты  $H$  на длине волны  $\lambda_{\text{off}}$ ;  $N_{\text{sum}}$  — суммарный фоновый и темновой шум.

Посредством лидарного уравнения (4) отношение рассеяния  $R_{\text{off}}(H)$  определяется как

$$R_{\text{off}}(H) = \frac{[N_{\text{off}}(H) + N_{\text{sum}}] H^2}{C T^2(H) \beta^{\text{m}}(H)}, \quad (5)$$

где эхо-сигналы  $N(H)$  и шум  $N_{\text{sum}}$  взяты из лидарных измерений,  $T(H)$  определяется из модельных представлений, которые скорректированы непосредственно по лидарным данным;  $\beta^m(H)$  находится по моделям атмосферы или из дополнительных, например радиозондовых, измерений.

Аппаратурная константа  $C$  обычно неизвестна, определяется с помощью нормировки  $R(H)$  [15]. Процедура нормировки заключается в нахождении минимума функции  $R_{\text{off}}(H)$  на интервале высот, где  $N(H)$ ,  $T^2(H)$  и  $\beta^m(H)$  могут быть предельно точно определены. Для высоты  $H_k$ , по которой  $R_{\text{off}}(H)$  получает минимальное значение  $R_{\min}$ , считается, что сигнал обратного рассеяния формируется преимущественно за счет молекулярного рассеяния,  $R_{\min}$  наиболее близко к единице. С учетом выполненной нормировки выражение  $R_{\text{off}}(H)$  примет вид

$$R_{\text{off}}(H) = \frac{\left[ N_{\text{off}}(H) + N_{\text{sum}} \right] H^2 \beta^m(H_k)}{\left[ N_{\text{off}}(H_k) + N_{\text{sum}} \right] H_k^2 T^2(H \div H_k)} R_k. \quad (6)$$

Математически преобразованные уравнения  $C$  и  $D$ :

$$C = \frac{d}{dH} \left\{ \ln \left[ (\lambda_{\text{off}} / \lambda_{\text{on}})^x [1 - 1/R_{\text{off}}(H)] + 1/R_{\text{off}}(H) (\lambda_{\text{off}} / \lambda_{\text{on}})^4 \right] \right\}, \quad (7)$$

$$D = 2 \cdot 0.04 \left\{ \beta_{\text{off}}^a(H) \left[ 1 - (\lambda_{\text{off}} / \lambda_{\text{on}})^x \right] \right\} = 2 \cdot 0.04 \left\{ [R_{\text{off}}(H) - 1] \beta_{\text{off}}^m(H) \left[ 1 - (\lambda_{\text{off}} / \lambda_{\text{on}})^x \right] \right\}, \quad (8)$$

где  $R_{\text{off}}(H)$  — реальное распределение коэффициента рассеяния;  $x$  — параметр, характеризующий размер частиц.

Видимая простота формулы (2) создает впечатление легкости практической реализации метода дифференциального поглощения. Однако несоблюдение ряда условий и жестких требований, из которых не все вытекают из этих формул, может привести к существенным погрешностям при интерпретации данных лазерного зондирования. Для проверки полученных ВРО важно учитывать вертикальное распределение погрешности. Погрешность восстановления ВРО из лидарных измерений рассчитывается по формуле:

$$E_{\text{sum}}^2 = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2, \quad (9)$$

где  $e_1$  — погрешность сечения поглощения;  $e_2$  — среднеквадратическая погрешность лидарного измерения в режиме счета фотонов;  $e_3$  — погрешность восстановления отношения рассеяния;  $e_4$  — погрешность профиля температуры.

Основными источниками ошибок метода дифференциального поглощения и рассеяния являются статистический характер регистрируемого сигнала и систематические погрешности измерений, связанные с влиянием атмосферного аэрозоля и поглощением излучения другими газами. Среднеквадратическая (стандартная) погрешность лидарного измерения в режиме счета фотонов [16]:

$$e_2^2 = 0.25 \left[ \frac{1}{N_{\text{on}}(H) - N_{\text{noise}}(H)} + \frac{1}{N_{\text{off}}(H) - N_{\text{noise}}(H)} \right], \quad (10)$$

где  $N_{\text{noise}}$  — величина фона, полученная из лидарных измерений.

Погрешность восстановления отношения рассеяния:

$$e_3^2 = \frac{N_{\text{off}}(H)}{\left[ N_{\text{off}}(H) - N_{\text{noise}}(H) \right]^2} + \frac{N_{\text{off}}(H_{\text{calib}})}{\left[ N_{\text{off}}(H) - N_{\text{noise}}(H_{\text{calib}}) \right]^2} + K, \quad (11)$$

где  $H_{\text{calib}}$  — высота калибровки;  $K$  — величина, появляющаяся из предположений методики получения отношения рассеяния, равная  $3 \cdot 0.01^2$  [15].

На рис. 1, а представлена блок-схема алгоритма записи данных лидарного зондирования атмосферы. В алгоритме предусмотрены основные функции: настройка параметров; графическое отображение данных лидарного зондирования на экран монитора; запись данных лидарного зондирования в файл. Алгоритм программы записи данных лидарного зондирования атмосферы реализует цикл “Оцифровка данных” с условием его остановки по команде оператора, в котором используются функции отображения данных лидарного зондирования на экран монитора; записи данных лидарного зондирования в файл. Алгоритм автоматически преобразует поступающие с лидарного комплекса для зондирования озона данные в численную форму в цикле “Оцифровка данных”. Результат работы алгоритма представляет собой файл зарегистрированных эхо-сигналов в бинарном формате dat. Это

необходимо для быстродействия процедуры записи данных лидарного зондирования в файл. В алгоритме предусмотрен визуальный контроль зарегистрированного эхо-сигнала.

Алгоритм программы восстановления профилей концентрации озона реализует цикл “Преобразование формата” с условием его остановки при завершении преобразования выбранных оператором файлов, в котором имеется основная функция — запись данных в файл txt. Блок-схема алгоритма для преобразования формата dat в txt представлена на рис. 1, б.

В алгоритме восстановления профилей концентрации озона предусмотрены следующие функции: настройка параметров; инициализация данных и загрузка эхо-сигналов из файлов; выбор сечений поглощений из предложенного набора; применение аэрозольной коррекции по формуле (6); применение температурной коррекции; восстановление профилей концентрации озона по формуле (2); расчет погрешности восстановления по формулам (9)–(11); графическое отображение профилей концентрации озона на экран монитора; запись данных восстановления в файл. Алгоритм программы восстановление профилей концентрации озона представлен на рис. 1, в.

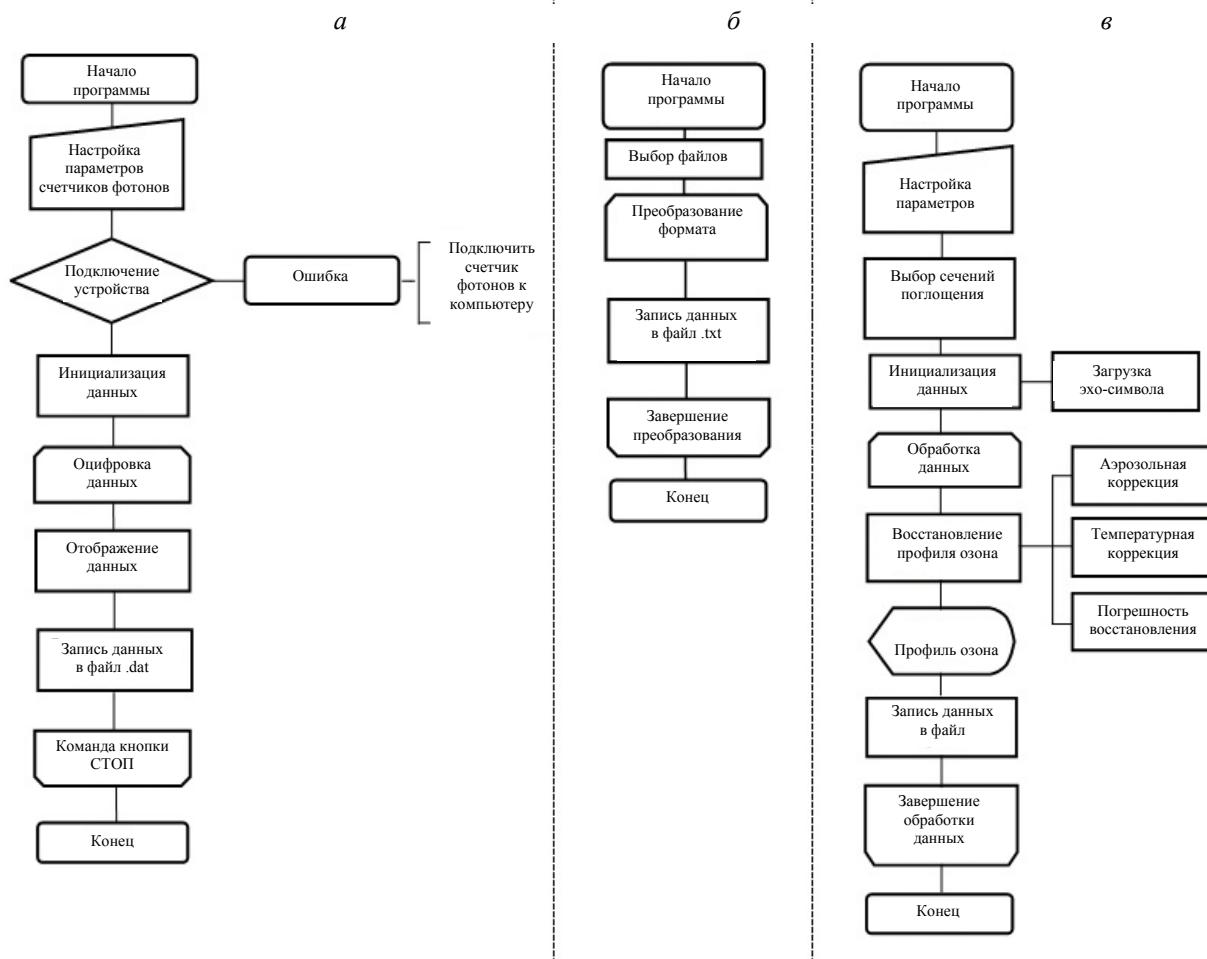


Рис. 1. Блок-схемы алгоритма записи данных лидарного зондирования атмосферы (а), алгоритма для преобразования формата файла .dat в .txt (б) и алгоритма восстановления профилей концентрации озона (в)

**Разработка программного комплекса для обработки данных лидарного зондирования.** Для функционирования озонового лидара на основе представленного алгоритма реализован программный комплекс регистрации и обработки данных, в состав которого входят три программных модуля: “Программа записи данных лидарного зондирования атмосферы”, “Программа преобразование формата файла dat в txt”, “Программа восстановления профилей концентрации озона”. Программы представлены в виде исполняемых файлов PHCOUNT\_4E.exe и Profile.exe. Программное обеспечение, необходимое для функционирования программного комплекса, — операционная система (ОС)

Windows Vista/7/8/10, среда разработки Visual Studio 2017. Минимальные системные требования для запуска программ: CPU 32/64bit 2.4 GHz; ОЗУ 4 ГБ. Исходный текст программного комплекса подготовлен с использованием языков программирования C++ и C#. Описанные алгоритмы на основе формул (1)–(11) реализованы как часть программного комплекса лидара для зондирования озона.

Разработанная программа записи данных лидарного зондирования атмосферы и программа преобразования формата файла dat в txt написаны на языке программирования C++. После запуска исполняемого файла PHCOUNT\_4E.exe программы записи данных лидарного зондирования атмосферы на вкладке “Измерения” 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 установкой параметров в поля, расположенные на вкладке “Измерение”. К ним относятся основные поля: управление состоянием соединения (“Connect”, “Disconnect”), размер пространственного разрешения (строба) в метрах или наносекундах в зависимости от выбранной единицы измерения, отсрочка запуска в метрах или наносекундах, время накопления файла (в секундах), начало и конец суммирования для оценки фона, запись заданного количества файлов на карту; время обновления графиков при просмотре в режиме осциллографа, выбор синхронизации: транзисторно-транзисторная логика (TTL) или оптоволокно. Для старта работы программы записи данных лидарного зондирования атмосферы оператору необходимо нажать кнопку “Старт”. После запуска функционирования счетчика фотонов в автоматическом режиме проводится запись данных лидарного зондирования в файлы формата dat. Это необходимо для быстродействия процедуры записи данных лидарного зондирования. После нажатия кнопки “Стоп” функционирование программного продукта прекращается.

В режиме реального времени во время измерений отображается текущая информация: количество сохраненных файлов, время накопления, количество принятых импульсов старта и вид накопленных лидарных сигналов для каждого канала. Результаты измерения отображаются в области окна, 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 с разными цветами: зеленый; синий; красный; черный. После завершения измерений все файлы в формате dat хранятся на SD-карте счетчика фотонов. Чтобы преобразовать бинарные файлы формата dat в текстовый txt, оператору необходимо перейти на вкладку “Файлы с данными”. Во вкладке “Файлы с данными” предлагается выбор файлов по команде “Открыть файл(ы)”, сохраненных в бинарном формате dat на SD-карте счетчика фотонов. По команде кнопки “Конвертирование dat файл(ы) в txt” выполняется преобразование в формат txt для последующей обработки файлов на компьютере. Для удобства при выборе файлов для конвертирования оператор может воспользоваться опциями “Forward” и “Back”.

Созданная программа восстановления профилей концентрации озона предназначена для обработки лидарных сигналов и позволяет восстанавливать ВРО с учетом температурной и аэрозольной коррекции. Программа представляет собой набор процедур, каждая из которых решает определенную подзадачу расчета по формулам (1)–(11). Благодаря этому существует возможность редактирования и внесения изменений, например введение нового ряда температурных точек с более актуальными сечениями поглощения, с увеличением функциональных возможностей продукта. Результатом работы программного продукта являются картинки в виде графиков профилей концентрации озона либо файлы с восстановленными профилями озона, в которых представлены данные в численном виде, в том числе погрешность восстановления, и рабочая информация о восстановлении в шапке файла. Обработанные данные хранятся в txt-файле.

Разработанная на основе описанного алгоритма программа восстановления профилей концентрации озона на языке программирования C# представляет собой загрузочный Profile.exe-файл с пакетом служебных файлов и позволяет считывать лидарные данные, записывать результаты восстановления в формате ASCII, корректировать параметры восстановления в формах настойки, проводить сглаживание скользящим средним лидарных сигналов или окном Хемминга, осуществлять температурную и аэрозольную коррекцию, сохранять картинку в виде графиков сигналов или восстановленного профиля озона в форматах emf, png, gif, jpg, tif и bmp, проводить сглаживание результатов восстановления.

Обработка начинается с открытия главной формы программы. В момент открытия программы загружаются служебные файлы и графическая библиотека. Это позволяет устанавливать параметры

в окнах настройки, которые ранее применялись в предыдущих настойках. Библиотека ZedGraph.dll позволяет сохранять отображенные графики в картинки, регулировать масштаб и применять другие полезные функции. Главное окно программного продукта содержит кнопки управления сглаживанием, графическую область, где отображаются в виде графиков все производимые действия над лидарными сигналами и профилями озона и отношения рассеяния, кнопки сохранения результатов восстановления и отношения рассеяния, а также кнопки команд: открыть файл по параметрам выбранным оператором в диалоговом окне; открыть профиль озона или отношения рассеяния; восстановление профиля озона или отношения рассеяния; вызов формы настроек параметров для восстановления профилей концентрации озона или отношения рассеяния.

Для сокращения времени, затраченного на поиск адреса файлов, где хранятся лидарные измерения и куда сохраняются полученные результаты восстановления, имеются кнопки вызова формы файлового проводника, где можно указать путь папки хранения лидарных сигналов и путь для записи восстановленных профилей. На интерфейсе программы расположены поля отображения имени файла и значение фона с возможностью его редактирования. Имеются выбор шаблона загрузки лидарных файлов и его пространственного разрешения (строба), который зависит от количества информационных строк шапки подгружаемого файла, а также возможность выбрать набор сечений поглощения. После нажатия кнопки “Принять” в окне настройки все параметры записываются в служебном файле, из которого будут подгружаться в последующем открытии формы настроек для озона и отношения рассеяния.

В окне настроек присутствуют параметры сглаживания, разделенные на три участка с возможностью применения разного количества точек в этих частях. Это сделано для удобства работы со сглаживанием для сигналов с разным пространственным разрешением и(или) для сигналов с разными параметрами длин волн. В окнах настроек присутствуют поля управления диапазоном аэрозольной коррекции и диапазоном калибровки по алгоритму восстановления отношения рассеяния. Все поля параметров защищены от ошибочных действий оператора, таких как пересечение или выход за диапазон данных, введение отрицательных значений, букв и т. д. Входные данные представляют собой текстовые файлы в формате txt: температурные профили, данные лидарного зондирования. По команде кнопки “Сглаживание” выполняется сглаживание по ранее установленным оператором параметрам. Результаты работы программного комплекса в виде зарегистрированных 21.02.2022 г. лидарных сигналов и восстановленного вертикального профиля концентрации озона, а также рассчитанная на основе измерений погрешность восстановления ВРО представлены на рис. 2.

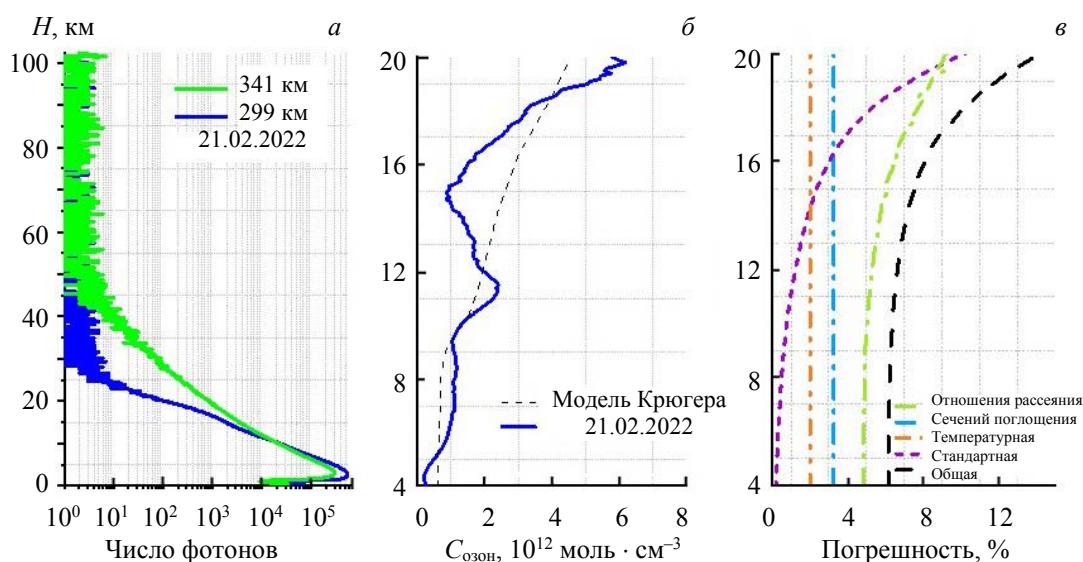


Рис. 2. Зарегистрированные лидарные сигналы на длинах волн 299/341 нм (α), восстановленный из лидарных сигналов вертикальный профиль концентрации озона (β), погрешность восстановления вертикальных профилей концентрации озона (γ)

**Заключение.** На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН разработан алгоритм и на его основе введен в эксплуатацию программный комплекс лидарного зондирования озона, функционирующий на длинах волн 299/341 нм. Интеграция счетчика фотонов PHCOUNT\_4E и модулей ФЭУ Н12386-210 служила стимулом к разработке нового алгоритма, который связал два этапа обработки данных — регистрацию лидарных сигналов и восстановление из этих данных профилей озона. Программный комплекс содержит следующие блоки: программа регистрации данных лидарного зондирования атмосферы; программа для преобразования формата бинарных файлов dat в текстовые txt-файлы; программа восстановления вертикальных профилей концентрации озона. На примере зондирования озона в Томске показаны возможности работы программного комплекса, который позволяет получать лидарные сигналы с высотным разрешением 1.5—150 м, а также восстанавливать профили концентрации озона на высотах 4—20 км.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-10051).

- [1] С. М. Бобровников, Г. Г. Матвиенко, О. А. Романовский, И. Б. Сериков, А. Я. Суханов. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы, Томск, ИОА СО РАН (2014)
- [2] B. Hassler, I. Petropavlovskikh, J. Staehelin, et al. Atm. Meas. Tech., 7, N 5 (2014) 1395—1427; <https://doi.org/10.5194/amt-7-1395-2014>
- [3] I. Stuart McDermid, S. M. Godin, L. O. Lindquist. Appl. Opt., 29, N 25 (1990) 3603—3612
- [4] I. S. McDermid, G. Beyerle, D. A. Haner, T. Leblanc. Appl. Opt., 41, N 36 (2002) 7550—7555
- [5] S. Godin-Beekmann, T. Songa, B. Heeseb. Proc. SPIE, 4893 (2003) 251—263
- [6] A. Gaudel, G. Ancellet, S. Godin-Beekmann. Atm. Environ., 113 (2015) 78—89
- [7] S. I. Dolgii, A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov, Yu. V. Gridnev, O. V. Kharchenko. Atmosphere, 11, N 2 (2020) 196
- [8] S. I. Dolgii, A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov, O. A. Romanovskii, O. V. Kharchenko. Remote Sens., 9, N 5 (2017) 447
- [9] X. Fang, T. Li, C. Ban, Z. Wu, J. Li, F. Li, Y. Cen, B. Tian. Opt. Express, 27 (2019) 4126—4139
- [10] P. J. Nair, S. Godin-Beekmann, L. Froidevaux, et al. Atm. Meas. Tech., 5, N 6 (2012) 1301—1318
- [11] S. I. Dolgii, A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov, O. A. Romanovskii, O. V. Kharchenko. J. Remote Sens., 41, N 22 (2020) 8590—8609
- [12] С. И. Долгий, А. А. Невзоров, А. В. Невзоров, О. А. Романовский, О. В. Харченко. Журн. прикл. спектр., 85 (2018) 861—867 [S. I. Dolgii, A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov, O. A. Romanovskii, O. V. Kharchenko. J. Appl. Spectr., 85, N 6 (2018) 1114—1120]
- [13] R. M. Measures. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, Malabar, Krieger Publishing Company (1992)
- [14] С. Л. Бондаренко, А. В. Ельников, В. В. Зуев. Опт. атм. и океана, 6, № 10 (1993) 1268—1277
- [15] А. В. Ельников, В. Н. Марищев, К. Д. Шелевой, Д. И. Шелефонюк. Опт. атм. и океана, 1, № 4 (1988) 117—123
- [16] V. V. Zuev, V. E. Zuev, Yu. S. Makushkin, V. N. Marichev, A. A. Mitsel. Appl. Opt., 22, N 23 (1983) 3742—3746