

УДК 551.510.532; 551.501.816

ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ОЗОНА В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ – НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Бурлаков Владимир Дмитриевич,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук»,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: burlakov@iao.ru

Долгий Сергей Иванович,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: dolgii@iao.ru

Невзоров Алексей Алексеевич,

программист научно-образовательного центра ФГБНУ «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук», Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1;
аспирант Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: naa@iao.ru

Невзоров Алексей Викторович,

канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: nevzorov@iao.ru

Романовский Олег Анатольевич,

д-р физ.-мат. наук, зав. научно-образовательным центром Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1;
профессор каф. управления инновациями факультета инновационных технологий
Национального исследовательского Томского государственного университета,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36. E-mail: roa@iao.ru

Харченко Ольга Викторовна,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Центра лазерного зондирования атмосферы
Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1. E-mail: olya@iao.ru

Прогнозирование состояния озонового слоя атмосферы нашей планеты, представляющего собой ценный и незаменимый георесурс, в настоящее время является важной научной и технической проблемой. Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки лазерных дистанционных методов зондирования озона для решения проблем контроля состояния окружающей среды и климатологии.

Цель исследования: разработка методики лазерного дистанционного зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере методом дифференциального поглощения с учетом температурной и аэрозольной коррекции и анализ результатов измерений.

Методы исследования: метод дифференциального поглощения, основанный на эффекте резонансного поглощения лазерного излучения в пределах селективной линии поглощения исследуемой газовой компоненты.

Результаты. Представлена методика восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения. Определены длины волн, перспективные для измерения профилей озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере. Для оперативного получения результатов работы методики разработан программный продукт на основе метода дифференциального поглощения с удобным и понятным интерфейсом на языке программирования C# для операционных систем Windows 7, использующий результаты лидарных измерений и позволяющий вести расчет восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом аэрозольной и температурной коррекции. Восстановленные профили озона, полученные в результате работы программы, сравнили со спутниковыми данными IASI и моделью Крюгера. Результаты применения разработанной методики восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции в диапазоне высот 6–18 км при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения подтверждают перспективность использования выбранных длин волн зондирования озона 299 и 341 нм в озоновом лидаре.

Ключевые слова:

Лидар, озон, атмосфера, дифференциальное поглощение, программа.

В настоящее время представляется актуальным рассмотрение вопросов техники и технологии прогнозирования состояния озонового слоя атмосферы, представляющего собой ценный георесурс, незаменимый для обеспечения комфортного состояния окружающей среды и решения проблем климатологии планеты.

Для исследования атмосферы и контроля ее состояния широко применяются методы дистанционного лазерного зондирования с использованием лидарной техники – лидара или лазерного локатора (lidar – аббревиатура от light detection and ranging). Наиболее чувствительным из методов, используемых для определения пространственного распределения концентрации какого-либо газа атмосферы, является метод дифференциального поглощения (МДП). В настоящее время лидарное зондирование малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, в том числе и озона, по МДП принципиально реализовано [1–3].

Начиная со второй половины 80-х гг. прошлого века лазерное зондирование озоносферы приобрело регулярный характер на ряде обсерваторий [4–7]. Оно дает информацию о вертикальном распределении озона (ВРО), удачно дополняя подобную информацию, получаемую контактным методом с помощью озонзондов и ракет, а также спутников (TOMS, SAGE-II, TERRA, и др.). Многолетние лидарные наблюдения стратосферного озона позволяют получить информацию о климатологии озоносферы, особенно выше 30 км, где данные озонзондов становятся нерепрезентативными.

Лазерное зондирование вертикального распределения стратосферного озона осуществляется на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск: 56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) с 1989 г. [8]. Длительный период лидарных наблюдений за стратосферным озоном показал, что наиболее значимая часть для исследований озоносферы расположена в нижней стратосфере, где озон подвержен влиянию динамического фактора. Лидарные измерения профилей ВРО по МДП в различных высотных диапазонах атмосферы с разным содержанием озона осуществляются на различных комбинациях длин волн [4–8].

Целью данной работы является выбор длин волн зондирования ВРО, разработка алгоритма и программы восстановления озоновых профилей с учетом температурной и аэрозольной коррекции и анализ результатов измерений.

Лидарные измерения ВРО осуществляются на основе метода дифференциального поглощения рассеянной назад энергии лазерного излучения в УФ диапазоне спектра 200–370 нм (полоса Хартли–Хаггинса) [9]. На практике в озоновых лидарах с помощью различных лазеров имеется возможность реализации нескольких вариантов пар длин волн зондирования. В табл. 1 представлены характеристики некоторых лидаров, применяемых для исследования озона и работающих на разных комбинациях длин волн.

Более 85 % всего озона находится в стратосфере. При этом для измерений малых концентраций озона в тропосфере, с целью увеличения концентрационной чувствительности метода, при выборе длин волн зондирования необходимо смещаться ближе к центру полосы поглощения озона в более коротковолновую часть. В этой части спектра его сечение поглощения σ в разы выше, чем для длин волн, используемых при стратосферных измерениях (например, для длины волны $\lambda_{on}=299$ нм – $\sigma_{299}=4,4 \cdot 10^{-19}$ см², а для $\lambda_{on}=308$ нм – $\sigma_{308}=1,4 \cdot 10^{-19}$ см²).

Для тропосферных измерений озона обычно используется излучение эксимерного KrF-лазера (248 нм) или 4-я гармоника Nd: YAG-лазера (266 нм) в сочетании с техникой, основанной на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в H₂, D₂, CO₂ и других газах [4, 5, 7, 10–15]. Наиболее распространенными являются водород и дейтерий. Возможный набор длин волн, соответствующих 1, 2, 3 стоксовым (С) частотам ВКР преобразования в H₂, D₂ и CO₂, представлен в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики лидаров, применяемых для исследования стратосферного озона

Table 1. Features of the lidars applied for studying stratospheric ozone

Страна (пункт наблюдения) Country (observation point)	Начало измерения (г.) Start of measuring (year)	Источник излучения: длина волны, нм/энергия импульса, мДж/частота следования импульсов, Гц Radiation source: wavelength, nm/pulse energy, mJ/pulse repetition frequency, Hz	Получаемый сигнал (диаметр), м Receiving mirror (diameter), m	Ссылка Reference
США, Калифорния USA, California (34° с.ш., 118° в.д.)	1986	XeCl+BKP (H ₂) 308–353	0,9	[10]
Франция, Верхний Прованс France, Upper Provence (44° с.ш., 6° в.д.)	1986	XeCl+Nd: YAG 308/250/50; 355/150/50	4 зеркала (mirrors) по 0,53	[11]
Россия, Томск Russia, Tomsk (56,5° с.ш., 85° в.д.)	1989	XeCl+BKP (H ₂) 308/100/100; 353/50/100	2,2 0,5 0,3	[8]
Германия, Хоенпайсенберг Germany, Hohenpaysenberg (48° с.ш., 11° в.д.)	1987	XeCl+BKP (H ₂) 308/300/20; 353/150/20	0,6	[12]
Франция, Италия, Антарктика France, Italy, Antarctic (66° ю.ш., 140° в.д.)	1991	XeCl+Nd: YAG 308/180/80; 355/180/10	0,8	[13]
Аргентина, Буэнос-Айрес Argentina, Buenos Aires (35° ю.ш., 59° з.д.)	1999	XeCl+Nd: YAG 308/300/100; 355/255/10	0,5	[14]

Note: с.ш. – N; в.д. – E; ю.ш. – S; з.д. – W.

В различных высотных диапазонах тропосферы и нижней стратосферы на практике используются различные комбинации длин волн. Так, пары длин волн 289/316 и 287/299 нм позволяют получать профиль вертикального распределения озона до высот ~10 км [4, 5]; пара 292/319 нм – до высот 14–16 км [4]; пары 277/313 и 292/313 нм – до высот 8–12 и 15 км, соответственно [7].

Таблица 2. Набор длин волн, соответствующих Stokes (C) частотам ВКР преобразования в H_2 , D_2 и CO_2

Table 2. Set of wavelengths corresponding to Stokes (C) frequencies of simulated Raman scattering into H_2 , D_2 and CO_2

Излучение накачки (нм) Pumping radiation (nm)	Длины волн (нм), соответствующие Stokes частотам (C) ВКР преобразования в Wavelengths (nm) corresponding to Stokes (C) frequencies of simulated Raman scattering into		
	H_2 $C_1 C_2$	D_2 $C_1 C_2 C_3$	CO_2 $C_2 C_3$
Nd: YAG, 266	299 341	289 316	287 299
KrF, 248	277 313	268 291 319	

Нами проведены численные оценки возможностей зондирования профилей ВРО в верхней тропосфере – нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм. При расчетах закладывались реальные параметры лидара: энергия излучения на обеих длинах волн 20 мДж; частота повторения лазерных импульсов 15 Гц; диаметр приемного зеркала 0,5 м; время накопления сигнала 1,5 ч. Для определения эффективности приемопередатчика использовались реальные значения пропускания оптических элементов спектральной селекции и эффективности фотоэлектронных умножителей, шумы брались из реальных измерений. Расчеты показали, что при применении этих длин волн максимальная высота потолка зондирования составляет ~22 км (озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км), но при этом появилась возможность измерений озона в тропосфере. Ошибка определения концентрации озона находится в пределах 4–10 % до высот ~20 км.

Максимальная высота зондирования определяется, прежде всего, дальностью регистрации сигнала на λ_{on} , которая всегда меньше, чем дальность регистрации сигнала на λ_{off} , вследствие большего поглощения озоном. С этой стороны $\lambda_{on}=299$ нм предпочтительнее, чем 277 или 292 нм. Кроме того, длины волн 299 и 341 реализуются в одном пучке зондирования (от одного лазерного источника в одной DRH ячейке), в отличие, например, от пары 292/313 нм (табл. 2). При этом система на основе ВКР ячейки с водородом дешевле, чем на дейтерии.

Таким образом, пара длин волн 299/341 нм является наиболее информативной для проведения измерений профилей ВРО в тропосфере – нижней стратосфере (диапазон высот 5–22 км).

Выбранные длины волн зондирования 299/341 нм были задействованы в разработанном озоновом лидаре. На рис. 1 приведена блок-схема разработанного лидара. В качестве источника лазерного излучения используется 4-я гармоника (266 нм) основной частоты излучения Nd: YAG лазера (модель LS-2134UT фирмы LOTIS ТП, Минск) с последующим ее ВКР-преобразованием в водороде в первую (299 нм) и вторую (341 нм) Stokesовые компоненты.

Приемный телескоп разработан по схеме Ньютона на основе главного зеркала диаметром 0,5 м с фокусным расстоянием 1,5 м. Регистрирующий тракт лидара укомплектован фотоумножителями (R7207-01) и усилителями-дискриминаторами (C3866) фирмы «Hamamatsu». Регистрация лидарных сигналов ведется в режиме счета импульсов фототока. Для обеспечения линейных режимов работы ФЭУ используется механический обтюратор, который отсекает мощный оптический сигнал от ближней зоны зондирования. Автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала разработан на основе шаговых двигателей с управлением от компьютера.

ВКР-ячейка изготовлена из трубы (нержавеющая сталь) с внутренним диаметром 3 см и длиной 1 м. Входное и выходное окна изготовлены из кварца КУ. Энергия импульса накачки на длине волны 266 нм составляет 60 мДж. Необходимая для получения эффекта ВКР преобразования плотность мощности накачки обеспечивается линзой – Л1 с фокусным расстоянием 1 м, которая устанавливается перед ВКР-ячейкой и фокусирует излучение на ее центр. После ячейки конфокально с фокусирующей линзой устанавливается коллимирующая линза – Л2.

Основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов озонового лидара:

Передатчик	
Длина волны зондирования, λ нм	299 341
Энергия импульса, мДж (соотв. λ)	25 20
Частота следования, Гц (соотв. λ)	15
Расходимость, мрад	0,1–0,3
Приемник	
Диаметр зеркала, м	0,5
Фокусное расстояние, м	1,5

Была определена эффективность ВКР преобразования в зависимости от давления водорода в ячейке. Давление водорода в ячейке изменялось от 1 до 9 атм. Полученная на выходе из ВКР-ячейки зависимость относительных интенсивностей излучения накачки (266 нм), первой (299 нм) и второй (341 нм) Stokesовых компонент ВКР преобразования от давления водорода представлена на рис. 2.

При давлении водорода 2 атм интенсивности линий 299 и 341 нм сравниваются, что дает возможность зондирования озона при равных энергетиках излучения на этих длинах волн. Однако для увеличения потолка зондирования более эффективно использовать давление 1 атм, т. к. при этом энергетика перераспределяется в пользу линии

299 нм, которая сильнее поглощается озоном, чем линия 341 нм.

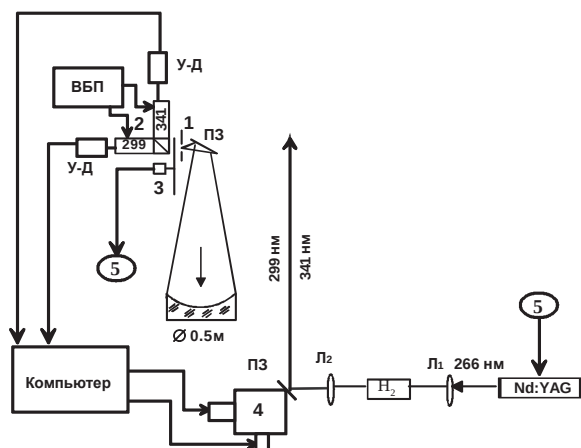


Рис. 1. Блок-схема озового лидара: 1 – полевая диафрагма; 2 – кювета спектральной селекции с ФЭУ; 3 – механический obturator; ПЗ – поворотные зеркала; 4 – автоматизированный юстировочный узел выходного поворотного зеркала; Nd: YAG – твердотельный лазер; Н₂ – ячейка ВКР преобразования с водородом; УД – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; Л₁, Л₂ – линзы; 5 – система синхронизации времени срабатывания obturatorа и посылки лазерных импульсов

Fig. 1. Block diagram of the ozone lidar: 1 is the field diaphragm; 2 is the cuvette of spectral selection with PMT; 3 is the mechanical obturator; ПЗ (FM) is the folding mirror; 4 is the automated alignment node of the output folding mirror; Nd: YAG is the solid-state laser; H₂ (N₂) is the cell of Raman conversion with hydrogen; УД is the amplifier-discriminator; БП are the high voltage power supplies; Л₁, Л₂ are the lenses; 5 is the system of time synchronization of the obturator response and parcel of laser pulses

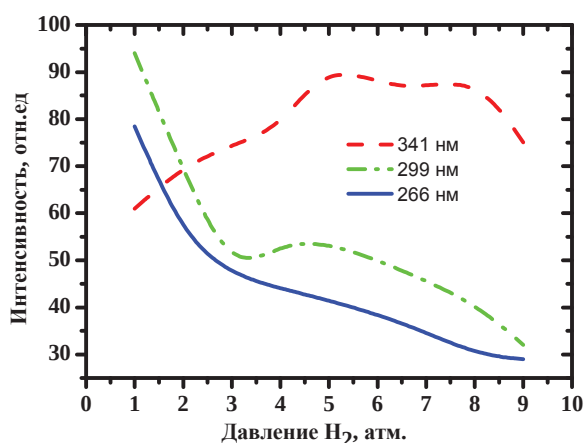


Рис. 2. Зависимость относительных интенсивностей излучения накачки (266 нм), первой (299 нм) и второй (341 нм) стоксовых компонент ВКР преобразования от давления водорода

Fig. 2. Dependence of relative intensities of pump radiation (266 nm), the first (299 nm) and the second (341 nm) Stokes components of stimulated Raman conversion on hydrogen pressure

В основу разработанной методики восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции легли следующие исходные выражения для определения концентрации озона при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения [16]:

$$\begin{aligned} N_{on}(H) &= c[\beta_{on}^a(H) + \beta_{on}^m(H)] \times \\ &\times \exp \left[-2 \int_0^H \alpha_{on}^a(H) + \alpha_{on}^m + k_{on} n(H) \right], \\ N_{off}(H) &= c[\beta_{ff}^a(H) + \beta_{ff}^m(H)] \times \\ &\times \exp \left[-2 \int_0^H \alpha_{off}^a(H) + \alpha_{off}^m + k_{off} n(H) \right], \end{aligned}$$

где на соответствующих длинах волн (на линии поглощения – *on* и вне линии поглощения – *off*) $N(H)$ – зарегистрированный эхо-сигнал; C – аппаратная постоянная; α^a – коэффициент ослабления аэрозольного рассеяния; β^a – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; k – коэффициент поглощения; $n(H)$ – концентрация озона. Путем математических преобразований получаем окончательное выражение для расчета концентрации озона:

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

Реальные изменения температуры в атмосфере могут вызвать существенные изменения коэффициента поглощения озона, что приводит к систематическим ошибкам восстановления профилей ВРО. Поэтому в алгоритме восстановления ВРО целесообразно проводить коррекцию на температурную зависимость $k_{\text{on}}(H, T)$, $k_{\text{off}}(H, T)$. В методике использована модель поведения сечения поглощения озона по температуре, приведенная в табл. 3, основанная на данных из работ [17, 18].

Таблица 3. Сечения поглощения озона (см^2) для диапазона 218–295 К на длинах волн зондирования озона [17, 18]

Table 3. Sections of ozone absorption (cm²) for ranges 218–295 K on the wavelength of ozone sounding

Длина волны, нм Wavelength, nm	Температура, К/Temperature, K				
	218	228	243	273	295
On line					
299	$4,1 \cdot 10^{-19}$	$4,1 \cdot 10^{-19}$	$4,25 \cdot 10^{-19}$	$4,3 \cdot 10^{-19}$	$4,6 \cdot 10^{-19}$
Off line					
341	$6 \cdot 10^{-22}$	$6 \cdot 10^{-22}$	$6 \cdot 10^{-22}$	$6 \cdot 10^{-22}$	$1,2 \cdot 10^{-21}$

Преобразуя данные табл. 3 в полином, получаем выражения для расчета части А в (1):

$$K_{299}(H, T) - K_{341}(H, T) = 5,8815E-16 - 1,1538E-17 \cdot (T(H) - 273) + 9,0281E-20 \cdot (T(H) - 273)^2 - 3,5194E-22 \cdot (T(H) - 273)^3 + 6,8356E-25 \cdot (T(H) - 273)^4 - 5,2918E-8 \cdot (T(H) - 273)^5$$

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 [19]. В рассматриваемом алгоритме расчета ВРО аэрозольная коррекция учитывается в выражениях С и D введением реального распределения отношения рассеяния $R_{off}(H)$, в то время как в обычной «невозмущенной» атмосфере расчет ВРО можно проводить при значениях $R_{off}(H)=1$. Математически преобразованные выражения [16] С, D и F:

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

$$D = 2 \cdot 0,04 \left\{ \beta_{off}^m(H) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^x \right] \right\} = 2 \cdot 0,04 \left\{ [R_{off}(H) - 1] \beta_{off}^m(H) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^x \right] \right\},$$

$$F = 2 \cdot 0,119 \beta_{off}^m(H) \left[1 - \left(\frac{\lambda_{off}}{\lambda_{on}} \right)^4 \right],$$

где на соответствующих длинах волн λ (на линии поглощения – λ_{on} и вне линии поглощения – λ_{off}); $R_{off}(H)$ – реальное распределение отношения рассеяния; x – параметр характеризует размер частиц; $\beta_{off}^a(H)$ – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния; $\beta_{off}^m(H)$ – коэффициент обратного молекулярного рассеяния.

Известно, что задача дифференцирования эмпирических функций относится к классу некорректно поставленных задач. Некорректность проявляется в нарушении устойчивости решения, а именно, небольшие погрешности в исходных данных могут приводить к большим ошибкам решений, а в ряде случаев в появлении отрицательных значений концентрации газа. В данной методике решения некорректной задачи не приводят к «разбалтываемости» решения восстановленного профиля озона за счет хорошо настроенной лидарной системы и высокой точности проведенных экспериментов, таким образом ошибка каждого элемента исходных данных минимальна, что существенно для решения подобных задач.

Разработанная на основе описанной выше методики программа [20] на языке программирования C# для операционных системы Windows 7 представляет собой загрузочный exe файл с пакетом служебных файлов и дает возможности восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы, структурная схема которой приведена на рис. 3, а также позволяет:

- считывать лидарные данные;
- записывать результаты восстановления в формате ASCII;
- проводить сглаживание скользящим средним лидарных сигналов;

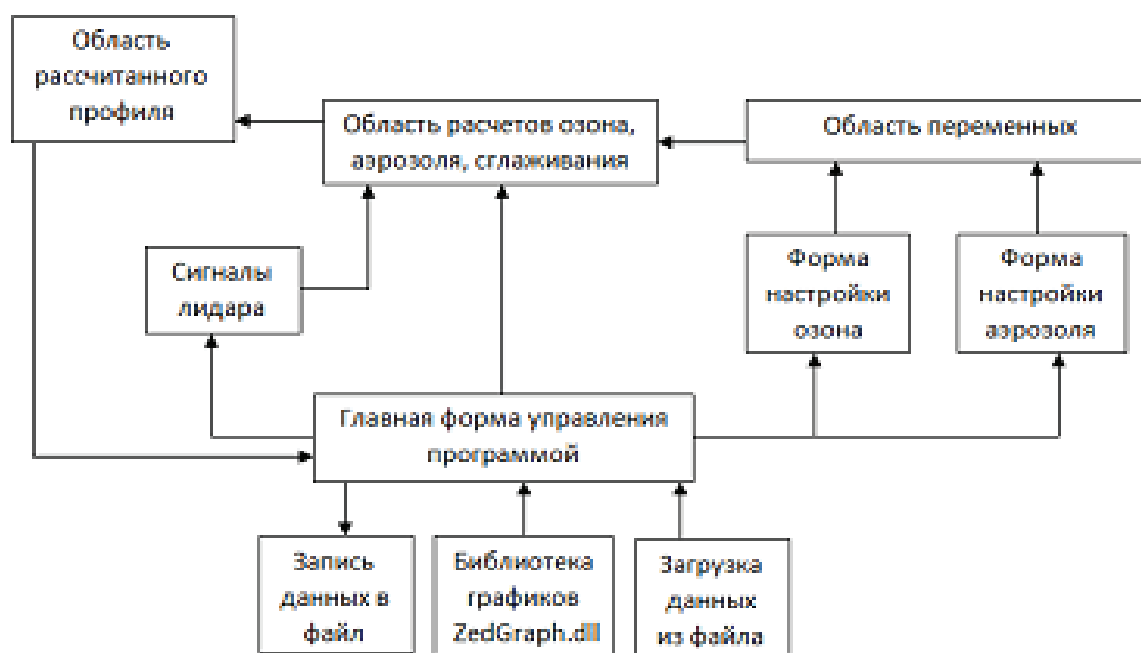


Рис. 3. Структурная схема программы для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы

Fig. 3. Block diagram of the program for retrieval of ozone vertical profiles from the data of laser sensing of the atmosphere

- осуществлять температурную и аэрозольную коррекцию;
- проводить сглаживание результатов восстановления ВРО.

На рис. 4 представлен интерфейс программы для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы.

Для уменьшения ошибок восстановления в программе введена температурная коррекция коэффициентов поглощения озона. При восстановлении лидарных сигналов на длинах волн зондирования 272/289 и 299/341 нм необходимо учитывать

большую концентрацию аэрозоля в диапазоне высот 0–20 км, поэтому в данной программе учитывается коррекция на аэрозоль. Для расчетов в программе введены среднеширотные сезонные модельные значения высотного распределения температуры и коэффициента обратного молекулярного рассеяния для зимы и лета.

В разработанной программе применяется линейное сглаживание как для входных лидарных данных, так и для результатов восстановления. Линейное сглаживание (сглаживание скользящим средним) является хорошо известной процедурой и

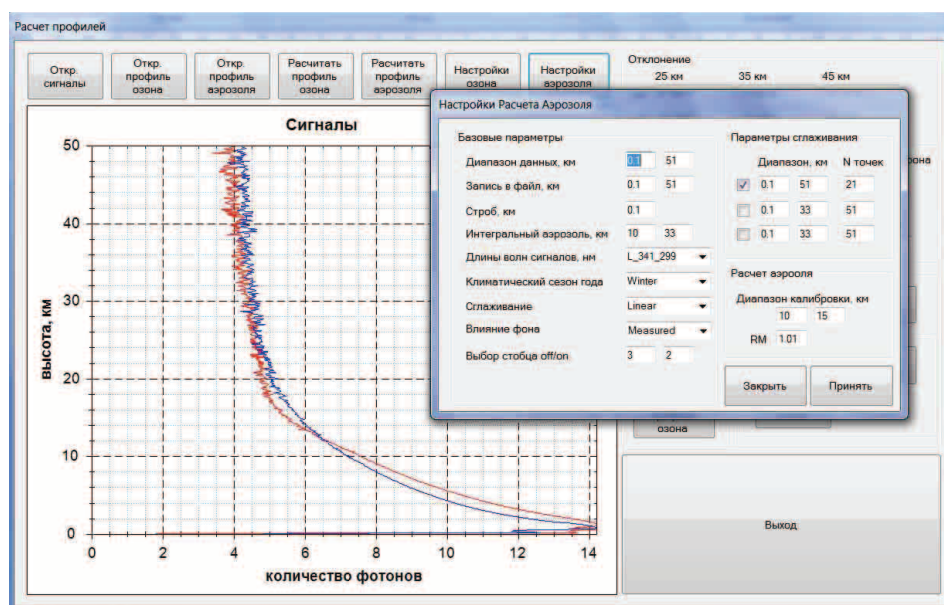


Рис. 4. Интерфейс программы для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы

Fig. 4. Program interface for retrieval of ozone vertical profiles from the data of laser sensing of the atmosphere

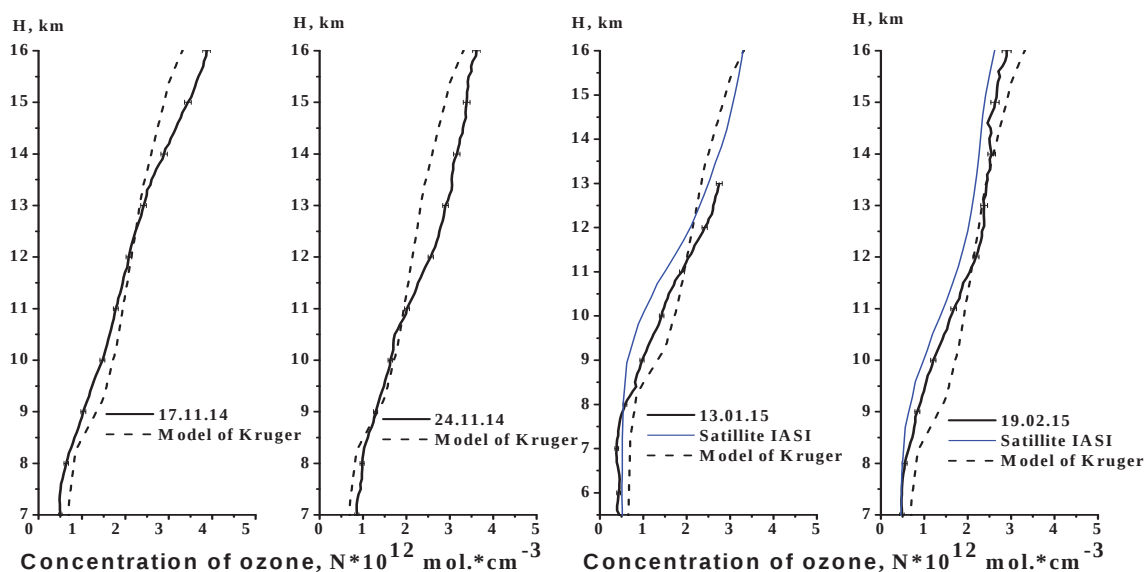


Рис. 5. Восстановленные профили вертикального распределения озона в сравнении с моделью Крюгера и спутниковыми данными IASI за 2014 и 2015 гг.

Fig. 5. Reconstructed profiles of ozone vertical distribution in comparison with the model of Krueger and IASI satellite data for 2014 and 2015

широко применяется при обработке данных эксперимента в различных областях естествознания. Линейное сглаживание является частным случаем числовой фильтрации обладающего случайной ошибкой сигнала фильтром с прямоугольным окном и весовыми коэффициентами, равными единице.

Разработанные методика и программа были использованы при восстановлении профилей ВРО в верхней тропосфере – нижней стратосфере на длинах волн зондирования 299/341 нм. Примеры восстановленных профилей озона с температурной и аэрозольной коррекцией за 2014 и 2015 гг. в сравнении с моделью Крюгера [21] и спутниковыми данными IASI представлены на рис. 5.

Результаты лидарных измерений на длинах волн 299 и 341 нм согласуются с модельными оценками, которые указывают на приемлемые точности зондирования озона в диапазоне высот около 6–18 км. Стоит отметить, что восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных, чем к модели Крюгера.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Выбранная пара длин волн 299/341 нм является наиболее информативной для проведения измерений профилей ВРО в тропосфере – нижней стратосфере. Лидар, работающий на этих дли-

нах волн, является единственным в России. При этом излучение на двух длинах волн реализуется в одном лазерном пучке от одного лазерного источника, что значительно упрощает процесс юстировки лидара и работу с ним по сравнению с лидарами, использующими два различных лазерных источника.

2. Разработанная методика и программа восстановления профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции позволяет получать профили ВРО в диапазоне высот 6–18 км при лидарном зондировании атмосферы методом дифференциального поглощения.
3. Результаты лидарных измерений на длинах волн 299 и 341 нм согласуются с модельными оценками и спутниковыми данными, которые указывают на приемлемые точности зондирования озона в тропосфере – нижней стратосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда (Соглашение № 14–27–00022 в части разработки методики восстановления профилей вертикального распределения озона и Соглашение № 15–17–10001 в части проведения лидарных измерений озона) и гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-4714.2014.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения: Результаты моделирования и экспериментов / Д.А. Бочковский, О.А. Романовский, О.В. Харченко, С.В. Яковлев // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 127–136.
2. Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2008. – V. 17. – № 2. – P. 131–137.
3. Bochkovskii D.A., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Laser Remote Measurements of Atmospheric Gas Components by DIAL: Modeling and Experiments // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – V. 23. – № 3. – P. 156–163.
4. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system / E. Galani, D. Balis, P. Zanis, C. Zerefos, A. Papayannis, H. Wernli, E. Gerasopoulos // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108. – № D12. – P. STA12-1-STA12-10.
5. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide / Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Yasuo Hirose // Appl. Opt. – 2007. – V. 46. – № 12. – P. 2269–2279.
6. Лидарная система для зондирования стратосферного и тропосферного озона на основе эксимерных лазеров / В.С. Букреев, С.К. Вартапетов, И.А. Веселовский, А.С. Галустов, Ю.М. Ковалев, А.М. Прохоров, Е.С. Светогоров, С.С. Хмелевцов, Ч.Х. Ли // Квантовая электроника. – 1994. – Т. 21. – № 6. – С. 591–596.
7. High resolution lidar measurements of stratosphere-troposphere exchange / H. Eisele, H.E. Scheel, R. Sladkovic, T. Trickl // J. Atmos. Sci. – 1999. – V. 56. – № 3. – P. 319–330.
8. Первые результаты лидарных наблюдений стратосферного озона над Западной Сибирью / А.В. Ельников, В.В. Зуев, В.Н. Маричев, С.И. Царегородцев // Оптика атмосферы и океана. – 1989. – Т. 2. – № 09. – С. 995–996.
9. Molina L.T., Molina M.T. Absolute absorption cross section of ozone in the 185-nm to 350-nm wavelength range // J. Geophys. Res. – 1988. – V. 91. – № D13. – P. 14.501–14.508.
10. Optical systems design for a stratospheric lidar system / I.S. McDermid, T.D. Walsh, A. Deslis, M.L. White // Appl. Opt. – 1995. – V. 34. – № 27. – P. 6201–6210.
11. Godin S., David C., Lakoste A.M. Systematic ozone and aerosol lidar measurements at OHP (44° N, 6° E) and Dumont // Abstr. of Papers of the 17-th ILRC. – Sendai, Japan, 1994. – P. 409–412.
12. DIAL ozone measurements at the Met. Obs. Hohenpeißenberg: Climatology and trends / H. Claude, F. Scöenborn, W. Streinbrecht, W. Vandersee // Proc. 17-th ILRC Abstr. of papers. – Sendai, Japan, 1994. – P. 413–415.
13. The Antarctic ozone LIDAR system / L. Stefanutti, F. Castagnoli, M. Del Guasta, M. Morandi, V.M. Sacco, L. Zuccagnoli, S. Godin, G. Megie, J. Porteneuve // Appl. Phys. – 1992. – V. B55. – P. 3–12.
14. DIAL system for measurements of stratospheric ozone at Buenos Aires / A.F. Pazmino, M.B. Lavorato, G.J. Fochesatto et al. // In: Advances in Laser Remote Sensing. Selected Papers presented at the 20-th ILRC. – France, Vichy, 2000. – P. 373–376.
15. Измерение концентрации озона в нижней тропосфере лидаром дифференциального поглощения / В.С. Букреев, С.К. Вартапетов, И.А. Веселовский, Ю.С. Шаблин // Квантовая электроника. – 1996. – Т. 23. – № 4. – С. 363–367.
16. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 552 с.
17. Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence / J. Malicet, D. Daumont, J. Charbonnier, C. Parisse, A. Chakir, J. Brion // Journal of Atmospheric Chemistry. – 1995. – V. 21. – Iss. 3. – P. 263–273.

18. The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands / H. Zhu, Z.W. Qu, S.Y. Grebenshchikov, R. Schinke, J. Malicet, J. Brion, D. Daumont // *Journal of Chemical Physics*. – 2005. – V. 122. – Iss. 2. – Article Number 024310.
19. Ельников А.В., Зувев В.В. Двухчастотное лазерное зондирование озона стратосферы в условиях ее сильного аэрозольного наполнения // *Оптика атмосферы и океана*. – 1992. – Т. 5. – № 10. – С. 1050–1054.
20. Программа для восстановления высотных профилей озона из данных лазерного зондирования атмосферы: пат. Рос. Федерации № 2014661049; заявл. 04.09.14; опубл. 22.10.14. – 1 с.
21. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // *J. Geophys. Res.* – 1976. – V. 81. – № D24. – P. 4477–4481.

Поступила 17.06.2015 г.

UDC 551.510.532; 551.501.816

LIDAR SENSING OF OZONE IN THE UPPER TROPOSPHERE – LOWER STRATOSPHERE: TECHNIQUE AND RESULTS OF MEASUREMENTS

Vladimir D. Burlakov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square,
Tomsk, 634021, Russia. E-mail: moto@iao.ru

Sergey I. Dolgii,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square,
Tomsk, 634021, Russia. E-mail: dolgii@iao.ru

Alexey A. Nevzorov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square,
Tomsk, 634021, Russia. E-mail: naa@iao.ru

Alexey V. Nevzorov,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square,
Tomsk, 634021, Russia. E-mail: nevzorov@iao.ru

Oleg A. Romanovskii,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square,
Tomsk, 634021, Russia; National Research Tomsk State University,
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: roa@iao.ru

Olga V. Kharchenko,

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev square
Tomsk, 634021, Russia. E-mail: olya@iao.ru

Prediction of atmospheric ozone layer, which is the valuable and irreplaceable geo asset, is currently the important scientific and engineering problem. The relevance of the research is caused by the necessity to develop laser remote methods for sensing ozone to solve the problems of controlling the environment and climatology.

The main aim of the research is to develop the technique for laser remote ozone sensing in the upper troposphere – lower stratosphere by differential absorption method for temperature and aerosol correction and analysis of measurement results.

Research methods: the method of differential absorption based on the effect of resonant absorption of laser radiation within a selective absorption lines of the investigated gas components.

Results. The paper introduces the technique of recovering profiles of ozone vertical distribution considering temperature and aerosol correction in atmosphere lidar sounding by differential absorption method. The authors have determined wavelengths, promising to measure ozone profiles in the upper troposphere – lower stratosphere. To obtain promptly the results of the methodology the authors developed the software based on the method of differential absorption with user-friendly interface in the programming language C# for the Windows 7 operating system using the lidar measurements. The software allows calculating the recovery profiles of the vertical ozone distribution based on aerosol and temperature correction. The recovered ozone profiles, resulting from the program operation, were compared with IASI satellite data and Kruger model. The results of applying the developed technique to recover the profiles of ozone vertical distribution considering temperature and aerosol correction in the altitude range of 6–18 km in lidar atmosphere sounding by differential absorption method confirm the prospects of using the selected wavelengths of ozone sensing 341 and 299 nm in the ozone lidar.

Key words:

Lidar, ozone, atmosphere, differential absorption, program.

The research was supported by the Russian Science Foundation (Agreement № 14–27–00022 in regards to the development of sensing techniques and Agreement № 15–17–10001 in parts of the ozone lidar and measurements), grant of the President of the RF on support of leading scientific schools SS-4714.2014.5.

REFERENCES

1. Bochkovskii D.A., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Lidarnoye zondirovanie mal'kikh gasovykh sostavlyayushchikh atmosfery metodom differentsial'nogo pogloshcheniya: Resultaty modelirovaniya i experimentov [Lidar sounding of small gas components of the atmosphere by method of differential absorption: Results of modeling and experiments]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 127–136.
2. Romanovskii O.A. Airborne DIAL Lidar Gas Analysis of the Atmosphere by Middle IR Gas Lasers: Numerical Modeling. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2008, vol. 17, no. 2, pp. 131–137.
3. Bochkovskii D.A., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Laser Remote Measurements of Atmospheric Gas Components by DIAL: Modeling and Experiments. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2014, vol. 23, no. 3, pp. 156–163.
4. Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos, C., Papayannis A., Wernli H., Gerasopoulos E. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system. *J. Geophys. Res.*, 2003, vol. 108, no. D12, pp. STA12–1–STA12–10.
5. Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Yasuo Hirose. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide. *Appl. Opt.*, 2007, vol. 46, no. 12, pp. 2269–2279.
6. Bukreev V.S., Vartapetov S.K., Veselovskii I.A., Galustov A.S., Kovalev Yu.M., Prokhorov A.M., Svetogorov E.S., Khmelevtsov S.S., Lee Ch.H. Lidarnaya sistema dlya zondirovaniya stratosfernogo i troposfernogo ozona na osnove eksimernykh lazerov [Excimer-laser-based lidar system for stratospheric and tropospheric ozone measurements]. *Quantum Electron*, 1994, vol. 24, no. 6, pp. 546–551.
7. Eisele H., Scheel H.E., Sladkovic R., Trickl T. High resolution lidar measurements of stratosphere – troposphere exchange. *J. Atmos. Sci.*, 1999, vol. 56, no. 3, pp. 319–330.
8. Elnikov A.V., Zuev V.V., Marichev V.N., Tsaregorodtsev S.I. Pervye resultaty lidarnykh izmereniy stratosfernogo ozona nad zapadnoy Sibiriyu [First results of lidar observations of stratospheric ozone above Western Siberia]. *Atmospheric and oceanic optics*, 1989, vol. 2, no. 09, pp. 841–842.
9. Molina L.T., Molina M.T. Absolute absorption cross section of ozone in the 185-nm to 350-nm wavelength range. *J. Geophys. Res.*, 1988, vol. 91, no. D13, pp. 14.501–14.508.
10. McDermid I.S., Walsh T.D., Deslis A., White M.L. Optical systems design for a stratospheric lidar system. *Appl. Opt.*, 1995, vol. 34, no. 27, pp. 6201–6210.
11. Godin S., David C., Lakoste A.M. Systematic ozone and aerosol lidar measurements at OHP (44° N, 6° E) and Dumont. *Abstr. of Papers of the 17-th ILRC*. Sendai, Japan, 1994. pp. 409–412.
12. Claude H., Scönnenborn F., Streinbrecht W., Vandersee W. DIAL ozone measurements at the Met. Obs. Hohenpeißenberg: Climatology and trends. *Proc. 17-th ILRC Abst. of papers*. Sendai, Japan, 1994. pp. 413–415.
13. Stefanutti L., Castagnoli F., Del Guasta M. Morandi M., Sacco V.M., Zuccagnoli L., Godin S., Megie G., Porteneuve J. The Antarctic ozone LIDAR system. *Appl. Phys.*, 1992, vol. B55, pp. 3–12.
14. Pazmino A.F., Lavorato M.B., Fochesatto G.J. DIAL system for measurements of stratospheric ozone at Buenos Aires. *Advances in Laser Remote Sensing. Selected Papers presented at the 20-th ILRC*. France, Vichy, 2000. pp. 373–376.
15. Bukreev V.S., Vartapetov S.K., Veselovskiy I.A., Shablin Yu.S. Izmereniya ozonovoy kontsentratsii v nizheyy troposphere lidarnom differentsial'nogo pogloshcheniya [Measurement of ozone concentration in the lower troposphere by a differential absorption lidar system]. *Quantum Electron*, 1996, vol. 26, no. 4, pp. 355–359.
16. Mezheris R. *Lasernoe distantsionnoye zondirovanie* [Laser remote sounding]. Moscow, Mir Publ., 1987. 552 p.
17. Malicet J., Daumont D., Charbonnier J., Parisse C., Chakir A., Brion J. Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, vol. 21, Iss. 3, pp. 263–273.
18. Zhu H., Qu Z.W., Grebenshchikov S.Y., Schinke R., Malicet J., Brion J., Daumont D. The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands. *Journal of Chemical Physics*, 2005, vol. 122, Iss. 2, Article Number 024310.
19. Elnikov A.V., Zuev V.V. Dvukhchastotnoye lazernoye zondirovanie ozona stratosfery v usloviyakh ee sil'nogo aerolnogo napolneniya [Bifrequency laser sounding of stratospheric ozone under conditions of high degree of aerosol loading]. *Atmospheric and oceanic optics*, 1992, vol. 5, no. 10, pp. 681–683.
20. Nevzorov A.V., Nevzorov A.A., Romanovskii O.A. Programma dlya ustanovleniya vysotnykh profiley ozona iz dannykh lazernogo zondirovaniya atmosfery [Program for restoration of high-rise profiles of ozone from data of laser sounding of the atmosphere]. *Patent RF no. 2014661049*, 2014.
21. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, no. D24, pp. 4477–4481.

Received: 17 June 2015.