

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.4; 551.510.534

Лидарный комплекс для измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере – стратосфере**С.И. Долгий¹, А.А. Невзоров¹, А.В. Невзоров¹, А.П. Макеев¹,
О.А. Романовский^{1, 2}, О.В. Харченко^{1*}**¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*²*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 7.05.2018 г.

Представлен лидарный комплекс, созданный в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в г. Томске, установленный на Сибирской лидарной станции (56,5° с.ш., 85,0° в.д.) для исследования динамики озона в районе тропопаузы и отслеживания глобальных изменений озоносферы. Комплекс позволяет измерять вертикальное распределение озона в верхней тропосфере – стратосфере. При зондировании, осуществляемом по методу дифференциального поглощения и рассеяния, используются пары длин волн 299/341 и 308/353 нм. Достижимый лидарным комплексом охват высот составляет ~5–45 км.

Ключевые слова: лидар, лазерное зондирование, озон, AURA, MetOp; lidar, laser sensing, ozone, AURA, MetOp.

Введение

Лидарные измерения вертикального распределения озона осуществляются на основе метода дифференциального поглощения рассеянной назад энергии лазерного излучения в УФ-спектре 200–370 нм (полоса Хартли–Хаггинса) [1]. На практике в озоновых лидарах имеется возможность реализации нескольких вариантов пар длин волн зондирования. 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 [2–5]. В табл. 1 приведены

длины волн различных стоксовых компонент H₂, D₂, CH₄, CO₂, которые применяются в дистанционном лазерном зондировании озона, при использовании в качестве источника излучения эксимерных KrF, XeCl или твердотельных Nd:YAG-лазеров [6–12].

В г. Томске на Сибирской лидарной станции (СЛС) [9] проводится лидарное зондирование озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм. Эксперименты показали, что при этих длинах волн максимальный охват высот составляет ~5–20 км [10–12].

Цель данной работы – измерения вертикального распределения озона (ВРО) в верхней тропосфере – стратосфере в высотном диапазоне ~5–45 км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм с помощью

Таблица 1

Набор длин волн, соответствующих стоксовым частотам ВКР-преобразования в H₂, D₂, CO₂ и CH₄

Излучение накачки	Длина волны, нм									
	H ₂		D ₂			CO ₂			CH ₄	
	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂
Nd:YAG, 266 нм	299	341	289	316	349	276	287	299	288	314
KrF, 248 нм	277	313	268	292	319	–	–	–	268	290
XeCl, 308 нм	353	–	339	377	–	–	–	–	338	375

* Сергей Иванович Долгий (dolgi@iao.ru); Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzovov@iao.ru); Андрей Павлович Макеев (mar@

iao.ru); Олег Анатольевич Романовский (roa@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru).

Основные технические характеристики лазерных источников лидарной системы

Технические характеристики	Передатчик	
	Nd:YAG	XeCl
Длина волны зондирования λ , нм	299/341	308/353
Энергия импульса, мДж (соотв. λ)	25/20	100/50
Частота следования, Гц (соотв. λ)	15	100
Расходимость, мрад	0,1–0,3	0,1–0,3

лидарного комплекса и сопоставление результатов со спутниковыми данными. Лидарный комплекс по измерению озона в диапазоне высот 5–45 км позволит выявлять изменчивость ВРО в верхней тропосфере – стратосфере, где озон играет роль пассивного трассера циркуляционных процессов, и на высотах выше велопаузы (~26 км), где поведение озоносферы определяется фотохимическими процессами [13, 14].

Лидарный комплекс для измерения ВРО

Для расширения возможностей изучения особенностей вертикального распределения озона в верхней тропосфере – стратосфере, особенно в области локализации озонового слоя, и отслеживания его сезонной изменчивости модернизирован и введен в режим регулярных измерений лидарный комплекс по измерению ВРО в высотном диапазоне ~5–45 км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм.

На рис. 1 представлена блок-схема созданного лидарного комплекса для зондирования ВРО.

В качестве источников излучения лидарной системы для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере используется Nd:YAG-лазер – модель LS-2134UT Минской фирмы LOTIS ТП, работающий на длине волны 266 нм (см. табл. 1). Для измерений стратосферного озона используется эксимерный XeCl-лазер LPX-120i фирмы Lambda Physik, работающий на длине волны 308 нм (табл. 2). Излучения лазеров, проходя через ячейки ВКР-преобразования, попадают на автоматизированные поворотные зеркала, которые управляются от компьютера и выводятся в атмосферу.

Прием оптических сигналов ведется на телескоп с диаметром зеркала 0,5 м и фокусным расстоянием 1,5 м. После телескопа оптическое излучение попадает в кювету спектральной селекции, где происходит выделение по длинам волн зондирования.

Для тропосферных измерений используется оптика, работающая на длинах волн 299/341 нм, для стратосферных – 308/353 нм соответственно. Далее оптическое излучение фокусируется линзами на фотоэлектронные умножители (ФЭУ) R7207-01 фирмы HAMAMATSU, работающие в режиме счета импульсов фототока. Чтобы устранить искажения, обусловленные обратнорассеянными сигналами высокой интенсивности от ближней зоны зондирования или облаков, блоки ФЭУ оснащены электронным управлением коэффициента усиления. Электрические сигналы с ФЭУ поступают на усилители-дискриминаторы, где происходит их усиление и формирование импульсов до уровней +5 В. Сформированные электрические сигналы с усилителей-дискриминаторов поступают на соответствующие каналы регистратора импульсов (счетчик фотонов), который осуществляет накопление и запись лидарных сигналов в цифровом виде на жесткий диск компьютера.

Время измерения стратосферного озона составляет ~30–40 мин. Перенастройка приемника для регистрирования другой пары длин волн примерно

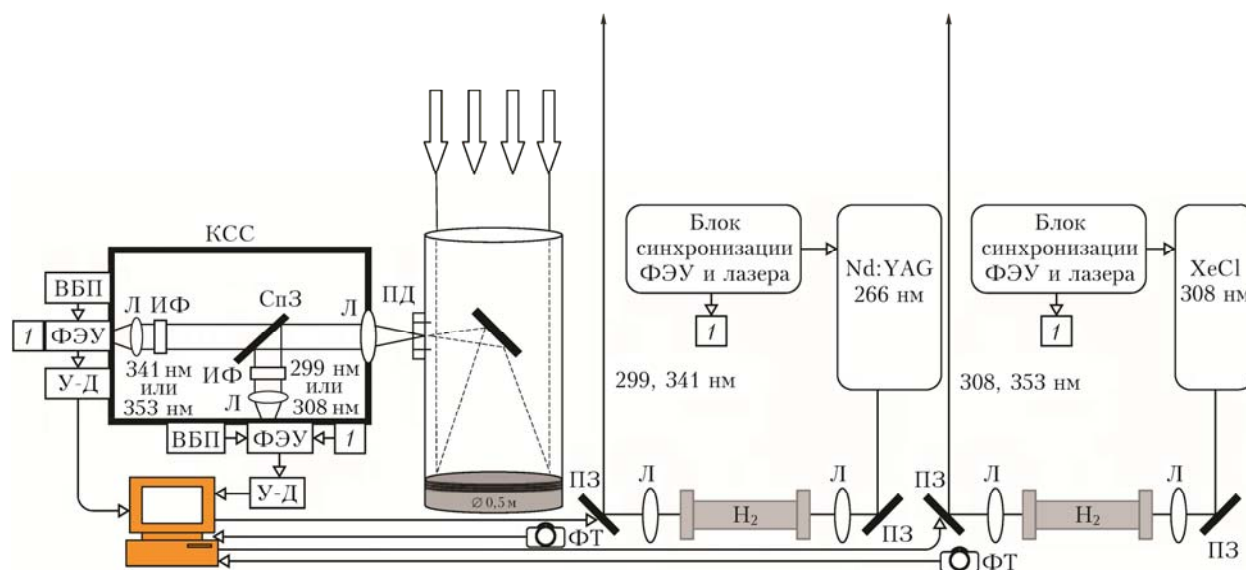


Рис. 1. Блок-схема лидарного комплекса для измерения ВРО: ПД – полявая диафрагма; КСС – кювета спектральной селекции с ФЭУ; СпЗ – спектроразделительное зеркало; У-Д – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; ПЗ – поворотные зеркала; Л – линзы; ФТ – фототранзистор; t – сигнал управления блоками ФЭУ; ИФ – интерференционные фильтры

~1–5 мин. Время измерения озона на паре 299/341 нм ~40 мин.

Обработка результатов измерений проводится с помощью методики восстановления лидарных профилей ВРО с учетом температурной и аэрозольной коррекции [12].

На рис. 2 представлены ошибки измерения вертикального распределения озона лидарного комплекса в верхней тропосфере – стратосфере.

Ошибка определения концентрации озона находится в пределах 12–35% для диапазона высот 5–20 км (ВРО верхней тропосферы – нижней стратосферы на длинах волн 299/341 нм) (рис. 2, а) и 10% для диапазона высот 15–45 км (ВРО стратосферы на длинах волн 308/353 нм) (рис. 2, б).

Таким образом, попеременное зондирование озона лидарным комплексом на парах длин волн 299/341 и 308/353 нм позволяет охватить в наиболее удачных измерениях диапазон высот от ~5 до ~45 км.

Результаты измерений ВРО в верхней тропосфере – стратосфере

Для иллюстрации работы созданной лидарной системы на рис. 3 представлены лидарные сигналы зондирования озона верхней тропосферы – стратосферы для 24.11.2017 г. Видно, что приемлемый для восстановления ВРО уровень сигналов сохраняется для диапазона высот 5–20 км на длинах волн 299/341 нм и 15–45 км на длинах волн 308/353 нм.

На основе лидарных сигналов для 24.11.2017 г. были восстановлены ВРО, которые объединяют лидарный контроль стратосферы и верхней тропосферы – нижней стратосферы. На рис. 4 показан ре-

зультат наложения восстановленных профилей озона из данных созданного лидарного комплекса для 24.11.2017 г. на фоне модели Крюгера [15].

В течение 2017 г. на СЛС с использованием модернизированной лидарной системы проведено 50 измерений стратосферного ВРО и 15 измерений ВРО верхней тропосферы – нижней стратосферы. По данным измерений были восстановлены профили ВРО, состоящие из профилей озона стратосферы и верхней тропосферы – нижней стратосферы. Они сопоставлялись с результатами измерений, полученными с помощью микроволнового радиометра MLS, установленного на борту метеорологического спутника AURA [16], а также интерферометра IASI, установленного на борту метеорологического спутника MetOpt. Координаты и время лидарного и спутникового зондирования приведены в табл. 3 и 4 соответственно. Лидарные измерения озона проводились в вечернее и ночное время в условиях безоблачного неба. Все профили ВРО приведены в сравнении с моделью Крюгера.

Стратосферные измерения озона представлены на рис. 5 в виде трех кривых: восстановленный лидарный профиль, AURA профиль и модель Крюгера. Видно, что профили, восстановленные из лидарных и спутниковых данных, совпадают с небольшими отклонениями на протяжении всего периода измерений. Отклонения обусловлены разницей между пространственным разрешением лидара (100 м) и спутника AURA (1,3 км и больше), соответственно количество точек, формирующих ВРО, больше у лидара, что также влияет на поведение кривой восстановленного ВРО. На рис. 5 представлены все рассмотренные случаи сопоставления профилей озона, измеренных на СЛС и восстановленных по данным AURA.

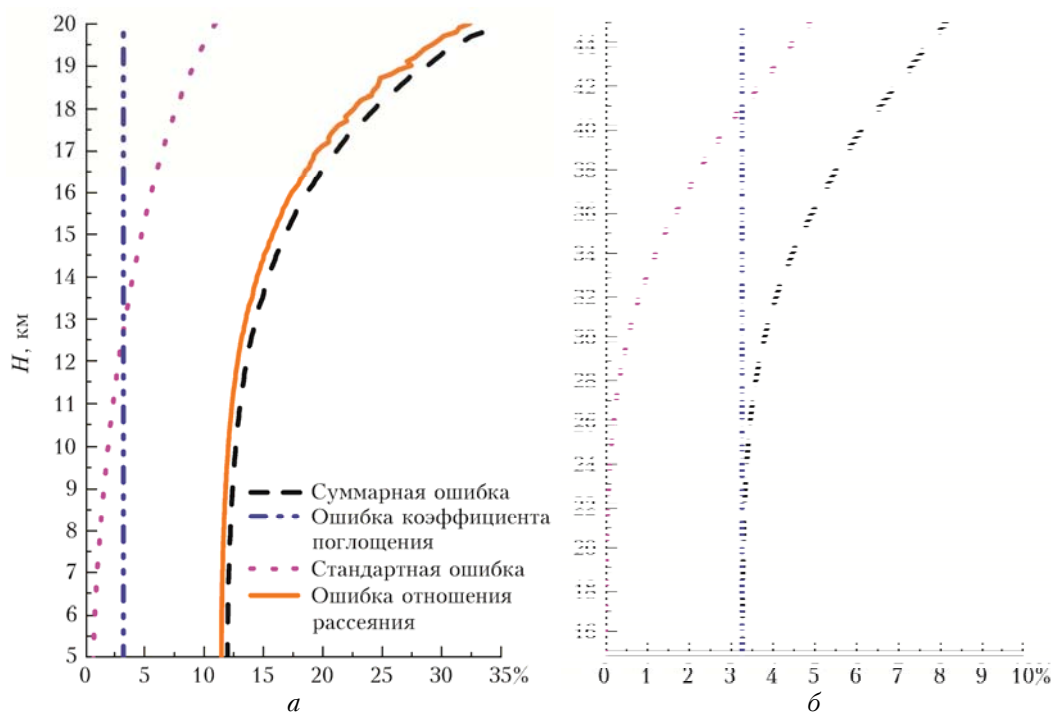


Рис. 2. Ошибки восстановления профилей озона верхней тропосферы – нижней стратосферы (а) и стратосферы (б)

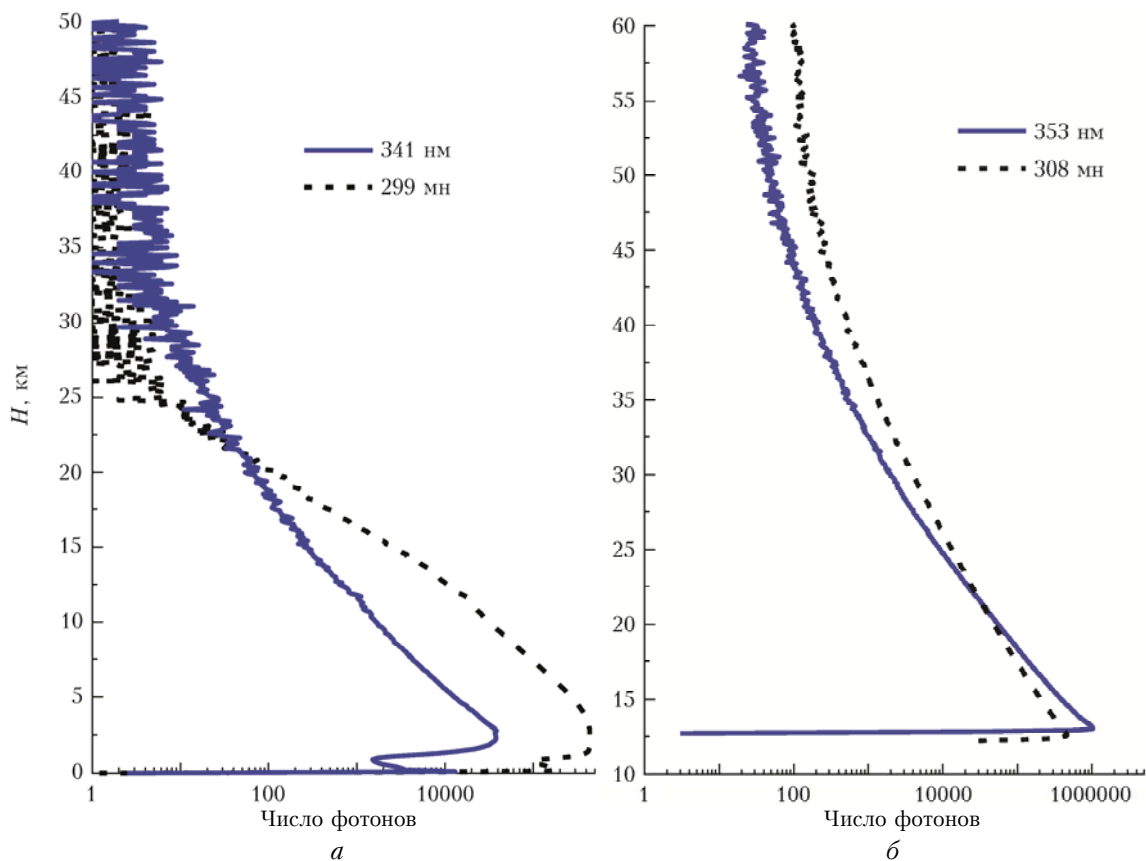


Рис. 3. Лидарные сигналы, зарегистрированные 24.11.2017 г.

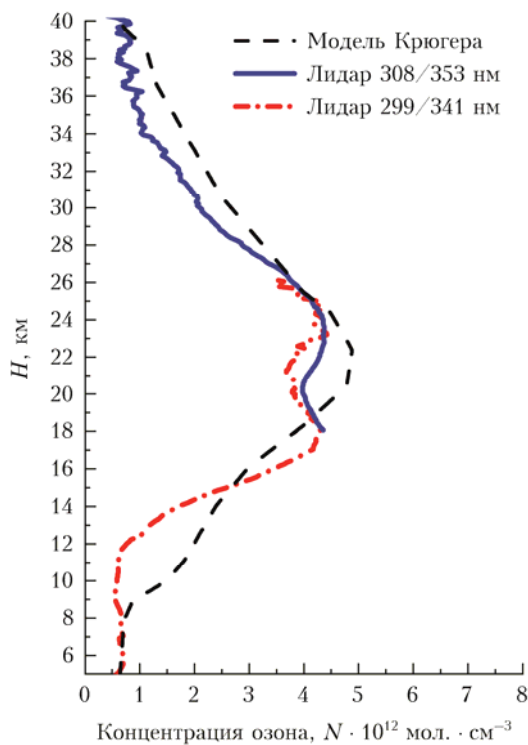


Рис. 4. Восстановленные профили озона стратосферы и верхней тропосферы – нижней стратосферы для 24.11.2017 г.

Измерения приведены к общему высотному диапазону 16–36 км для более удобного сравнения всех профилей. Из рис. 5 видно, что для всего периода наблюдений прослеживается завышение концентраций озона AURA по сравнению с данными лидара в диапазоне от 27 до 36 км.

На рис. 6 представлены рассмотренные случаи сопоставления профилей озона, измеренных на СЛС и ВРО по данным IASI. Измерения приведены к общему высотному диапазону 5–16 км для более удобного сравнения всех профилей. Также видно, что для всего периода наблюдений прослеживается завышение концентраций озона по лидарным данным в сравнении с данными IASI в диапазоне от 12 до 16 км.

Заключение

Таким образом, создан лидарный комплекс для измерения ВРО в верхней тропосфере – стратосфере в высотном диапазоне ~ 5–45 км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. Следующим шагом модернизации лидарного комплекса для измерения ВРО являются модификация лидарного приемника и настройка передатчиков для одновременного зондирования всей тропосферы и стратосферы или создание еще одного лидарного приемника, настроенного на прием сигналов второй пары длин волн.

Таблица 3

Координаты и время спутникового AURA (MLS) и лидарного зондирования, использованные для сравнения ВРО за 2017 г.

Дата	Лидарная станция (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.)	Спутник AURA (MLS)	
	Время по Гринвичу	Время по Гринвичу	Координаты (°с.ш.; °в.д.)
7.03	14:29–14:59	21:23	60,43; 79,86
16.03	15:04–15:44	21:17	60,43; 81,39
17.03	15:09–15:39	20:23	54,65; 91,90
20.03	14:25–14:55	20:53	59,00; 86,62
24.03	16:16–16:46	20:29	56,11; 91,10
20.04	16:13–16:43	06:41	57,56; 92,65
18.05	19:45–20:15	20:34	59,00; 91,22
19.05	18:51–19:21	21:19	53,20; 77,25
30.05	18:09–18:39	07:31	60,44; 78,46
3.06	18:46–19:16	20:35	54,66; 88,78
6.06	19:07–19:37	07:35	53,20; 81,02
15.06	14:19–14:49	20:58	59,00; 85,06
16.06	19:00–19:31	20:46	59,00; 88,15
27.06	17:48–18:18	21:23	57,56; 78,02
4.07	19:01–19:31	21:29	51,74; 89,44
2.08	17:35–18:05	20:59	56,11; 83,39
24.11	13:58–14:58	20:47	58,99; 88,16
19.12	13:22–13:52	20:41	56,10; 87,99

Таблица 4

Координаты и время спутникового и лидарного зондирования, использованные для сравнения ВРО за 2017 г.

Дата	Лидарная станция (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.)	Спутник MetOp (IASI)	
	Время по Гринвичу	Время по Гринвичу	Координаты (°с.ш.; °в.д.)
16.06	17:09–17:39	15:47	56,47; 85,04
26.06	18:46–19:21	16:00	56,47; 85,04
3.07	17:03–17:37	15:14	56,47; 85,04
2.08	18:01–18:35	15:26	56,47; 85,04
28.08	15:04–15:38	20:53	56,47; 85,04
24.11	11:18–12:27	15:11	56,47; 85,04
19.12	14:21–14:57	14:11	56,47; 85,04

Это позволит сократить время измерений вдвое и соответственно увеличить количество измерений. Последующим шагом стоит реализация зондирования неохваченных высот 0,1–5 км, что позволит контролировать всю озоносферу.

Результаты сопоставления восстановленных лидарных профилей ВРО в верхней тропосфере – нижней стратосфере и стратосфере со спутниковыми профилями AURA (MLS) и IASI/MetOp, а также сшитый профиль ВРО верхней тропосферы – стратосферы в сравнении со среднеширотной моделью Крюгера подтверждают перспективность использования пар длин волн зондирования озона 299/341 и 308/353 нм. Стоит отметить, что восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных AURA, чем к модели Крюгера.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Грдневу за любезно предоставленные данные, полученные с помощью аппаратуры IASI/MetOp.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке стипендии Президента РФ по поддержке молодых ученых и аспирантов (СП-3926.2018.3).

1. *Molina L.T., Molina M.T.* Absolute absorption cross section of ozone in the 185-nm to 350-nm wavelength range // *J. Geophys. Res. D.* 1988. V. 91, N 13. P. 14.501–14.508.
2. *Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos C., Papayannis A., Wernli H., Gerasopoulou E.* Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108, N 12. P. STA12-1–STA12-10.
3. *Nakazato M., Nagai T., Sakai T., Hirose Ya.* Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide // *Appl. Opt.* 2007. V. 46, N 12. P. 2269–2279.
4. *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.* Excimer-laser-based lidar system for stratospheric and tropospheric ozone measurements // *Quantum Electron.* 1994. V. 24, N 6. P. 546–551.

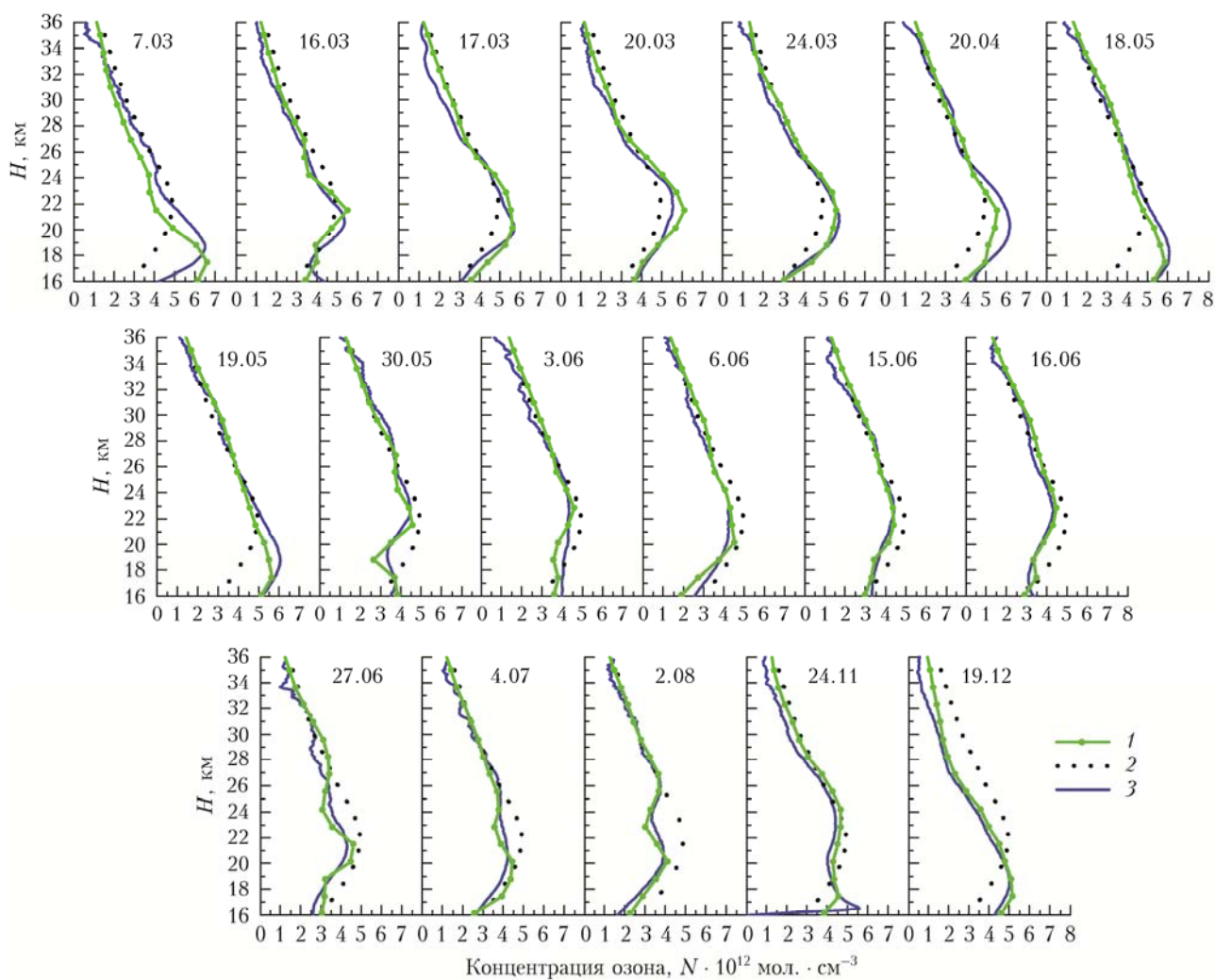


Рис. 5. Сопоставление лидарных стратосферных вертикальных профилей озона и данных AURA/MLS, полученных в 2017 г.: 1 – AURA; 2 – модель Крюгера; 3 – 308/353 нм

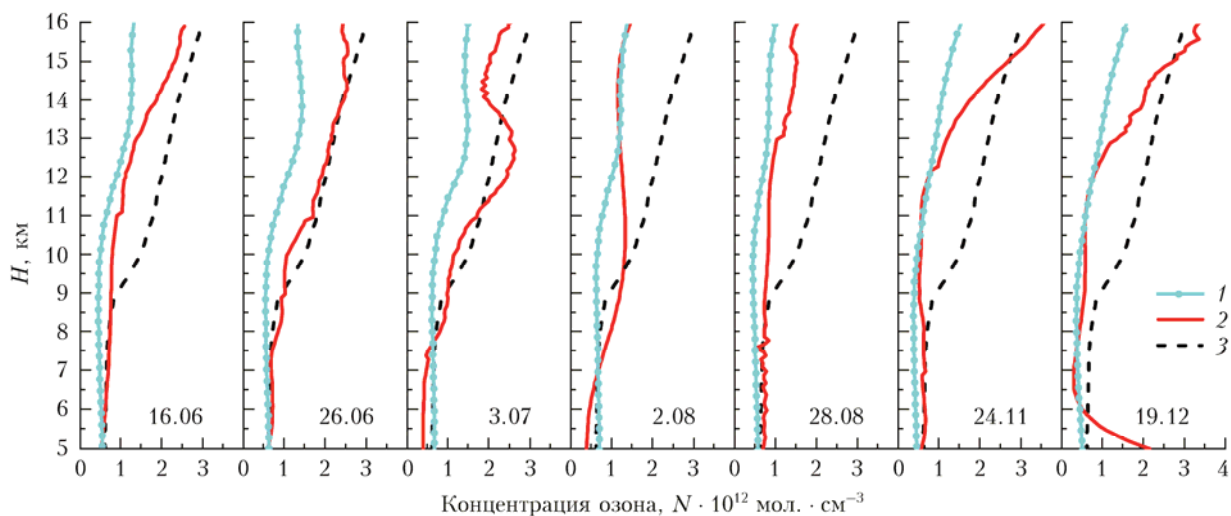


Рис. 6. Сопоставление лидарных вертикальных профилей озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере и данных IASI/MetOp, полученных в 2017 г.: 1 – IASI/MetOp; 2 – лидар 299/341 нм; 3 – модель Крюгера

5. Eisele H., Scheel H.E., Sladkovic R., Trickl T. High resolution lidar measurements of stratosphere – troposphere exchange // *J. Atmos. Sci.* 1999. V. 56, N 3. P. 319–330.
6. Букреев В.С., Варпанетов С.К., Веселовский И.А., Шаблин Ю.С. Измерение концентрации озона в нижней тропосфере лидаром дифференциального поглощения // *Квант. электрон.* 1996. Т. 23, № 4. С. 363–367.
7. Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. ВКР-преобразование излучения электроразрядного ХеСІ-лазера // *Квант. электрон.* 1986. Т. 13, № 7. С. 496–1500.
8. Schoulernikoff L., Mitev V., Simeonov V., Calpini B., van den Bergh H. Experimental investigation of high-power single-pass Raman shifters in the ultraviolet with Nd:YAG and KrF lasers // *Appl. Opt.* 1998. V. 36. P. 5026–5043.
9. Матвиенко Г.Г., Балин Ю.С., Бобровников С.М., Романовский О.А., Коханенко Г.П., Самойлова С.В., Пеннер И.Э., Горлов Е.В., Жарков В.И., Садовников С.А., Харченко О.В., Яковлев С.В., Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Makeev A.П., Nevzorov A.A., Nevzorov A.B. Сибирская лидарная станция: аппаратура и результаты / под ред. Г.Г. Матвиенко. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. 440 с.
10. Зувев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Nevzorov A.B. Лидар дифференциального поглощения для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 10. С. 880–883.
11. Burlakov V.D., Dolgii S.I., Makeev A.P., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. A differential-absorption lidar for ozone sensing in the upper atmosphere – lower stratosphere // *Instrum. Exp. Tech.* 2010. V. 53, N 6. P. 886–889.
12. Nevzorov A.A., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Nevzorov A.B., Романовский О.А., Харченко О.В., Гриднев Ю.В. Сравнение лидарных и спутниковых измерений вертикальных профилей озона по данным 2015 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 703–708.
13. Zhang H., Wu S., Huang Y., Wang Y. Effects of stratospheric ozone recovery on photochemistry and ozone air quality in the troposphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 4079–4086. DOI: 10.5194/acp-14-4079-2014.
14. Kirgis G., Leblanc T., McDermid I.S., Walsh T.D. Stratospheric ozone interannual variability (1995–2011) as observed by lidar and satellite at Mauna Loa Observatory, HI and Table Mountain Facility, CA // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 5033–5047. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-13-5033-2013> (last access: 7.04.2018).
15. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // *J. Geophys. Res.* D. 1976. V. 81, N 24. P. 4477.
16. URL: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/MLS/V04/L2GPOVP/O3/> (last access: 3.05.2018).

S.I. Dolgii, A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov, A.P. Makeev, O.A. Romanovskii, O.V. Kharchenko. Lidar complex for measurement of vertical ozone distribution in the upper troposphere – stratosphere.

A lidar complex designed at V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS in Tomsk and used at the Siberian lidar station (56.5 N., 85.0 W) for the study of ozone dynamics near tropopause and for tracking global ozonosphere changes is presented. It allows measurement of vertical ozone distribution in the upper troposphere – stratosphere during sounding with the differential absorption method at wavelength pairs of 299/341 and 308/353 nm. The lidar complex covers altitudes from ~5 to ~45 km.