

ЛИДАРНАЯ СИСТЕМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОЗОНА В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ—СТРАТОСФЕРЕ

С. И. Долгий¹, А. А. Невзоров¹, А. В. Невзоров¹, О. А. Романовский^{1,2*}, О. В. Харченко¹

УДК 535.34:551.510.534

¹ Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской АН, 634055, Томск, пл. Академика В. Е. Зуева, 1, Россия; e-mail: roa@iao.ru

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

(Поступила 4 июня 2018)

На Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН в Томске (56.5° с.ш., 85.0° в.д.) для исследования динамики озона в районе тропопаузы и отслеживания глобальных изменений озоносферы создана лидарная система, позволяющая измерять вертикальное распределение озона в верхней тропосфере—стратосфере. При зондировании, осуществляемом по методу дифференциального поглощения с учетом температурной и аэрозольной коррекции, используются пары длин волн 299/341 и 308/353 нм. Достижимый лидарной системой охват высот ~5—45 км.

Ключевые слова: атмосфера, лидарное зондирование, озон, дифференциальное поглощение.

At the Siberian Lidar Station of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS in Tomsk (56.5° N., 85.0° W), a lidar system is created to study the ozone dynamics in the tropopause region and to monitor the global changes in ozonosphere by measuring the vertical ozone distribution in the upper troposphere—stratosphere. Based on the method of differential absorption and taking into account the temperature and aerosol corrections, sensing is performed at wavelength pairs 299/341 and 308/353 nm. The lidar system covers the altitude range of ~5—45 km.

Keywords: atmosphere, lidar sounding, ozone, differential absorption.

Введение. Для исследования атмосферы и контроля ее состояния широко применяются методы дистанционного лазерного зондирования с использованием лидарной техники — лидара или лазерного локатора. Наиболее чувствительный метод для определения пространственного распределения концентрации какого-либо газа атмосферы — метод дифференциального поглощения (МДП). В настоящее время лидарное зондирование малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, в том числе озона, по МДП принципиально реализовано [1—3].

Лидарные измерения вертикального распределения озона (ВРО) осуществляются на основе МДП в УФ диапазоне спектра 200—370 нм (полоса Хартли—Хаггинса) [4]. На практике в озоновых лидарах имеется возможность реализации нескольких вариантов пар длин волн зондирования. Для измерений озона обычно используется излучение эксимерного KrF-лазера (248 нм) или четвертая гармоника YAG:Nd-лазера (266 нм) в сочетании с техникой, основанной на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в H₂, D₂, CO₂ и других газах [5—9]. На Сибирской лидарной станции (СЛС) (г. Томск) [10] проводится лидарное зондирование озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм. Эксперименты показали, что при применении этих длин волн максимальный охват высот ~5—20 км [9—11].

Цель данной работы — создание лидарной системы для измерения ВРО в верхней тропосфере—стратосфере в высотном диапазоне ~5—45 км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм в сопоставлении

LIDAR SYSTEM OF DIFFERENTIAL ABSORPTION FOR OZONE MEASUREMENT IN THE UPPER TROPOSPHERE—STRATOSPHERE

S. I. Dolgii¹, A. A. Nevzorov¹, A. V. Nevzorov¹, O. A. Romanovskii^{1,2*}, O. V. Kharchenko¹

(¹ V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Academician Zuev Sq., Tomsk, 634055, Russia; e-mail: roa@iao.ru; ² Tomsk State University, Tomsk, Russia)

со спутниковыми измерениями. Лидарная система 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 [12, 13].

Лидарная система для измерения ВРО. Для расширения возможностей изучения особенностей ВРО в верхней тропосфере—стратосфере, особенно в области локализации озонового слоя, и отслеживания его сезонной изменчивости модернизирована и введена в режим регулярных измерений лидарная система по измерению ВРО в высотном диапазоне ~5—45 км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. На рис. 1 представлена блок-схема созданной лидарной системы для зондирования ВРО, ее основные характеристики — в табл. 1.

В качестве источников излучения лидарной системы для зондирования озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере используется YAG:Nd-лазер, модель LS-2134UT (LOTIS ТП, г. Минск), работающий на $\lambda = 266$ нм, для измерений стратосферного озона — эксимерный XeCl-лазер LPX-120i (Lambda Physik), работающий на $\lambda = 308$ нм. Проходя через ячейки ВКР-преобразования, излучения лазеров попадают на автоматизированные поворотные зеркала (ПЗ), которые управляются компьютером, и выводятся в атмосферу. Прием оптических сигналов ведется на телескоп с диаметром зеркала 0.5 м. После телескопа оптическое излучение попадает в кювету спектральной селекции (КСС), где происходит выделение по длинам волн зондирования.

Для тропосферных измерений используется оптика, работающая на паре 299/341 нм, для стратосферных — 308/353 нм. Далее оптическое излучение фокусируется линзами (Л) на фотоэлектронные умножители (ФЭУ) R7207-01 (Hamamatsu), работающие в режиме счета импульсов фототока.

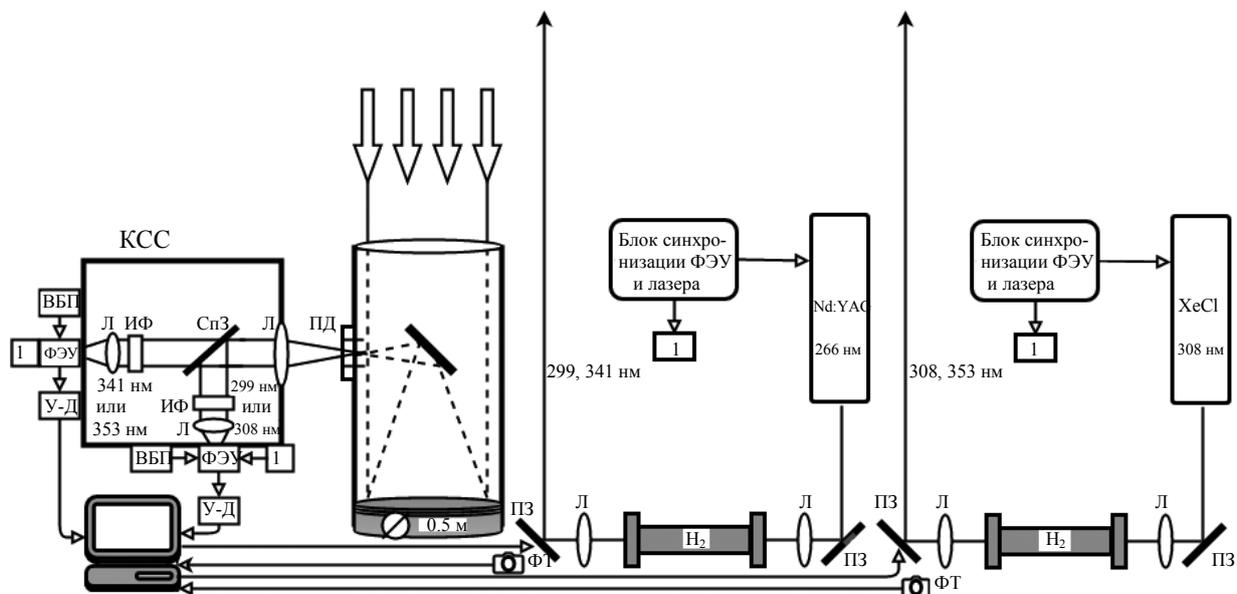


Рис. 1. Блок-схема лидарной системы для измерения ВРО: 1 — сигнал управления блоками ФЭУ; YAG:Nd и XeCl — лазерные источники; H₂ — ячейка ВКР-преобразования с водородом; ПД — полявая диафрагма; КСС — кювета спектральной селекции с ФЭУ; СпЗ — спектроделительное зеркало; УД — усилители-дискриминаторы; ВБП — высоковольтные блоки питания; ПЗ — поворотные зеркала, Л — линзы, ИФ — интерференционные фильтры; ФТ — фототранзисторы

Т а б л и ц а 1. Основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов лидарной системы

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

Для устранения искажений, обусловленных обратно рассеянными сигналами высокой интенсивности от ближней зоны зондирования или облаков, блоки ФЭУ оснащены электронным управлением коэффициентом усиления. Электрические сигналы с ФЭУ поступают на усилители-дискриминаторы (У-Д), где происходят их усиление и формирование импульсов до уровней +5 В. Сформированные электрические сигналы с У-Д 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 ~30—40 мин. Перенастройка приемника для регистрирования другой пары длин волн ~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.

Методика измерений ВРО. В основе методики восстановления лидарных профилей ВРО с учетом температурной и аэрозольной коррекции — уравнение [14]:

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

где $N(H)$ — зарегистрированный эхо-сигнал в линии поглощения (on) и вне ее (off); $\alpha^m(H)$ и $\alpha^a(H)$ — коэффициенты ослабления молекулярного и аэрозольного рассеяния; $\beta^m(H)$ и $\beta^a(H)$ — коэффициенты обратного молекулярного и аэрозольного рассеяния; k — коэффициент поглощения; $n(H)$ — концентрация озона.

Реальные вариации температуры в атмосфере могут вызвать существенные изменения в априорном расчете 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 предлагаемой нами методике использована зависимость сечения поглощения озона от температуры, полученная по последним экспериментальным и расчетным данным [15, 16] и представленная в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Сечения поглощения озона для диапазона 193—293 К на длинах волн зондирования озона [15, 16]

λ , нм	Температура, К										
	193	203	213	223	233	243	253	263	273	283	293
<i>On-line (10^{-19} cm^2)</i>											
299	4.12	4.15	4.25	4.15	4.3	4.25	4.36	4.36	4.38	4.46	4.58
308	1.13	1.14	1.16	1.17	1.18	1.19	1.24	1.25	1.28	1.31	1.35
<i>Off-line (10^{-22} cm^2)</i>											
341	5.62	5.94	6.1	6.95	7.05	7.59	8.15	8.9	9.9	10.8	11.5
353	0.495	0.64	0.725	0.888	0.957	1.1	1.27	1.45	1.67	2.02	2.38

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 [17]. В алгоритме расчета ВРО 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 $R_{\text{off}}(H) = 1$.

Восстановленные по данным лидарного зондирования профили ВРО сопоставлены с профилями, полученными с помощью интерферометра IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) метеоспутника MetOp и микроволнового радиометра MLS (Microwave Limb Sounder) метеоспутника AURA. Для обработки данных IASI использованы стандартные методы обращения спутниковых данных [18], для MLS — стандартные методы обращения спутниковых данных NASA [19].

Результаты измерений ВРО в верхней тропосфере—стратосфере. На рис. 2 представлены зарегистрированные лидарные сигналы зондирования озона верхней тропосферы—стратосферы 24 ноября 2017 г. на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. Видно, что приемлемый для восстановления ВРО уровень сигналов сохраняется для диапазона высот 5—20 км на паре 299/341 нм и 15—45 км на 308/353 нм. На основе лидарных сигналов для 24.11.2017 г. восстановлены ВРО, которые объединяют лидарный контроль стратосферы и верхней тропосферы—нижней стратосферы. На рис. 2, в показан результат наложения восстановленных профилей озона из данных созданного лидарного комплекса для 24.11.2017 на фоне модели Крюгера [20].

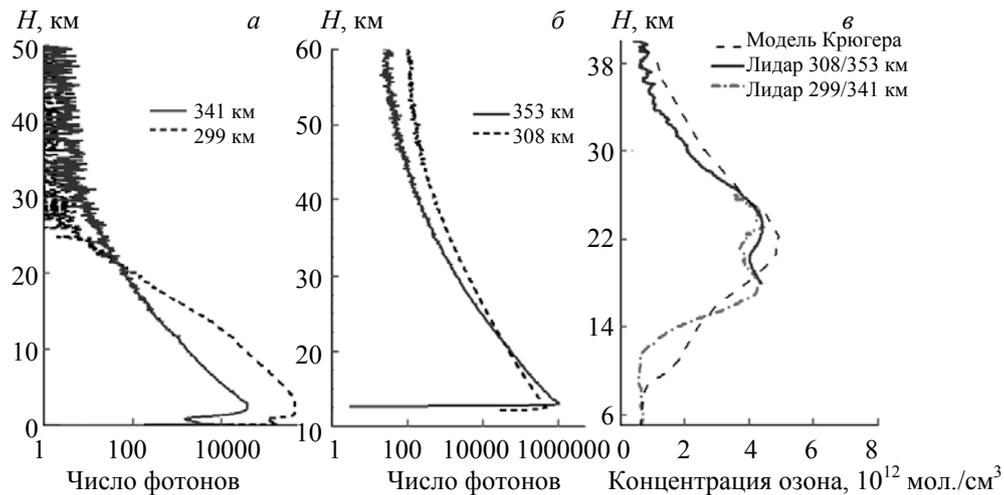


Рис. 2. Зарегистрированные лидарные сигналы на длинах волн 299/341 (а) и 308/353 нм (б) и восстановленные профили озона стратосферы и верхней тропосферы—нижней стратосферы (в) для 24.11.2017 г.

Т а б л и ц а 3. Координаты и время спутникового AURA (MLS) и лидарного зондирования, использованные для сравнения стратосферного ВРО за 2017 г.

Дата	Лидарная станция		Спутник AURA (MLS)	
	Время по Гринвичу (координаты: 56.5 с.ш., 85.0 в.д.)		Время по Гринвичу	Координаты
7.03.17	14:29—14:59		21:23	60.43 с.ш. 79.86 в.д
16.03.17	15:04—15:44		21:17	60.43 с.ш. 81.39 в.д
17.03.17	15:09—15:39		20:23	54.65 с.ш. 91.90 в.д
20.03.17	14:25—14:55		20:53	59.00 с.ш. 86.62 в.д
24.03.17	16:16—16:46		20:29	56.11 с.ш. 91.10 в.д
20.04.17	16:13—16:43		06:41	57.56 с.ш. 92.65 в.д
18.05.17	19:45—20:15		20:34	59.00 с.ш. 91.22 в.д
19.05.17	18:51—19:21		21:19	53.20 с.ш. 77.25 в.д
30.05.17	18:09—18:39		7:31	60.44 с.ш. 78.46 в.д
3.06.17	18:46—19:16		20:35	54.66 с.ш. 88.78 в.д
6.06.17	19:07—19:37		7:35	53.20 с.ш. 81.02 в.д
15.06.17	14:19—14:49		20:58	59.00 с.ш. 85.06 в.д
16.06.17	19:00—19:31		20:46	59.00 с.ш. 88.15 в.д
27.06.17	17:48—18:18		21:23	57.56 с.ш. 78.02 в.д
4.07.17	19:01—19:31		21:29	51.74 с.ш. 89.44 в.д
2.08.17	17:35—18:05		20:59	56.11 с.ш. 83.39 в.д
24.11.17	13:58—14:58		20:47	58.99 с.ш. 88.16 в.д
19.12.17	13:22—13:52		20:41	56.10 с.ш. 87.99 в.д

Т а б л и ц а 4. Координаты и время спутникового MetOp (IASI) и лидарного зондирования, использованные для сравнения ВРО верхней тропосферы—нижней стратосферы за 2017 г.

Дата	Лидарная станция	Спутник MetOp (IASI)	
	Время по Гринвичу (координаты: 56.5 с.ш., 85.0 в.д.)	Время по Гринвичу	Координаты
16.06.17	17:09—17:39	15:47	56.47 с.ш. 85.04 в.д
26.06.17	18:46—19:21	16:00	56.47 с.ш. 85.04 в.д
3.07.17	17:03—17:37	15:14	56.47 с.ш. 85.04 в.д
2.08.17	18:01—18:35	15:26	56.47 с.ш. 85.04 в.д
28.08.17	15:04—15:38	20:53	56.47 с.ш. 85.04 в.д
24.11.17	11:18—12:27	15:11	56.47 с.ш. 85.04 в.д

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 восстановлены профили ВРО, состоящие из профилей озона стратосферы и верхней тропосферы—нижней стратосферы. Они сопоставлены с результатами спутниковых измерений, полученными с помощью микроволнового радиометра MLS и интерферометра IASI. Координаты и время лидарного и спутникового зондирования для AURA (MLS) и MetOp (IASI) приведены в табл. 3 и 4. Лидарные измерения озона проводились в вечернее и ночное время в условиях безоблачного неба.

Результаты и их обсуждение. Из анализа данных восстановления стратосферных ВРО за весь рассматриваемый период 2017 г. (рис. 3) можно сделать следующие выводы. Разница между профилями концентраций (рис. 3, *а, б*), полученных на лидаре и MLS, растет с увеличением высоты. Вследствие этого средняя разность (лидар – MLS), или отклонение по всем дням измерений в концентрациях озона, изменяется от $-0.28 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на высоте 33.5 км до $0.21 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на 18.8 км (рис. 3, *б*). Максимальное по всем профилям отклонение — от $-0.03 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на высоте 35.1 км до $1.09 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на 24.2 км. Минимальное отклонение также по всем профилям изменяется от $-1.85 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на 16 км до $-0.11 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на высоте 25.3 км.

Озон имеет заметный годовой ход, и для того чтобы найти относительные погрешности его измерения прибором MLS (AURA), разность концентраций нормирована на значения, полученные лидаром: $100(\text{лидар} - \text{MLS})/\text{лидар}$ (рис. 3, *в*). Как видно, средняя относительная разность положительна в диапазоне высот 18—26.3 км, где достигает 4.79 % на 18.8 км, отрицательна в диапазонах высот 16—17.9 и 26.4—36 км, где достигает максимального отрицательного значения -26.45 % на 36 км. Максимальная относительная разность изменяется от -2.04 % на высоте 35.1 км до 27.13 % на 24.2 км. Минимальная по всем профилям относительная разность в этих высотах -121.9 % на 35 км и достигает -2.75 % на 25.3 км.

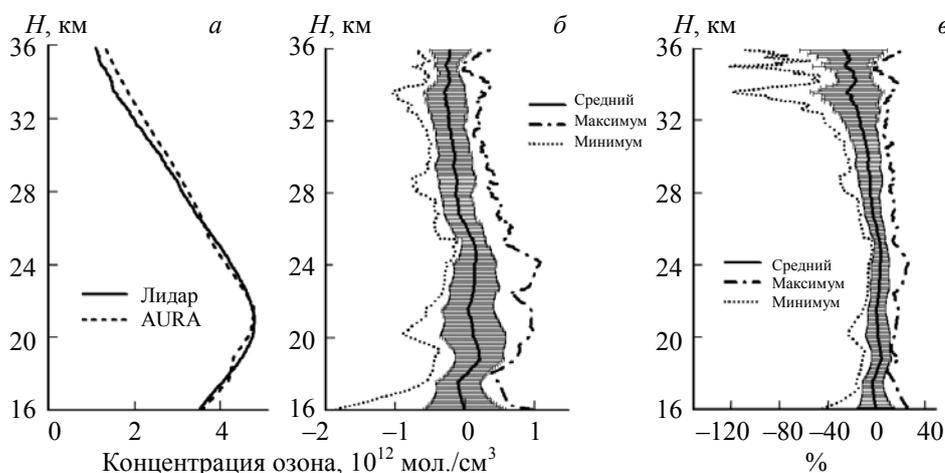


Рис. 3. Средние вертикальные профили озона и их различия: *а* — средние профили; *б* — различия лидар – MLS в абсолютных единицах; *в* — относительные различия $100(\text{лидар} - \text{MLS})/\text{лидар}$

Из анализа данных восстановления ВРО верхней тропосферы—нижней стратосферы за весь рассматриваемый период 2017 г. (рис. 4) можно сделать следующие выводы. Разница между профилями концентраций (рис. 4, *а, б*), полученными на лидаре и IASI, растет с увеличением высоты. Вследствие этого средняя разность (лидар – IASI), или отклонение по всем дням измерений в концентрациях озона, изменяется от $0.01 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на высоте 6.2 км до $1.03 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на 15.9 км (рис. 4, *б*). Максимальное по всем профилям отклонение составляет от $0.18 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на высоте 6.6 км до $1.97 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на 16 км, минимальное — от $-0.26 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на 6.1 км до $0.15 \cdot 10^{12}$ мол./см³ на высоте 8.7 км. Из данных по относительным различиям $100(\text{лидар} - \text{IASI})/\text{лидар}$ (рис. 4, *в*) видно, что средняя относительная разность положительна в диапазоне высот 6.9—16 км, где достигает 38.05 % на 15.9 км, и отрицательна в диапазоне высот 6—6.9 км, где достигает -3.48 % на 6.5 км. Максимальная относительная разность изменяется от 29.93 до 56.07 % на высотах 6.6 и 16 км. Минимальная по всем профилям относительная разность для этих высот составляет -60.39 % на 6 км и достигает 27.59 % на 8.6 км. На высоте 16 км относительная разница варьируется в диапазоне минимума и максимума от -3.7 до 56.07 %, на 6 км от -60.39 до 33.31 %.

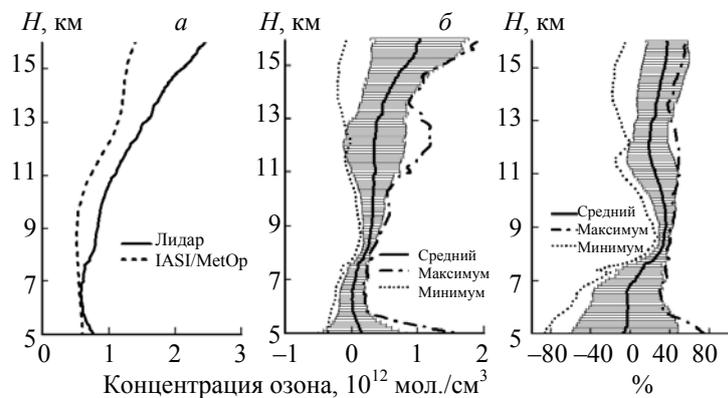


Рис. 4. Средние вертикальные профили озона и их различия: *а* — средние профили; *б* — различия лидар – IASI в абсолютных единицах; *в* — относительные различия $100(\text{лидар} - \text{IASI})/\text{лидар}$

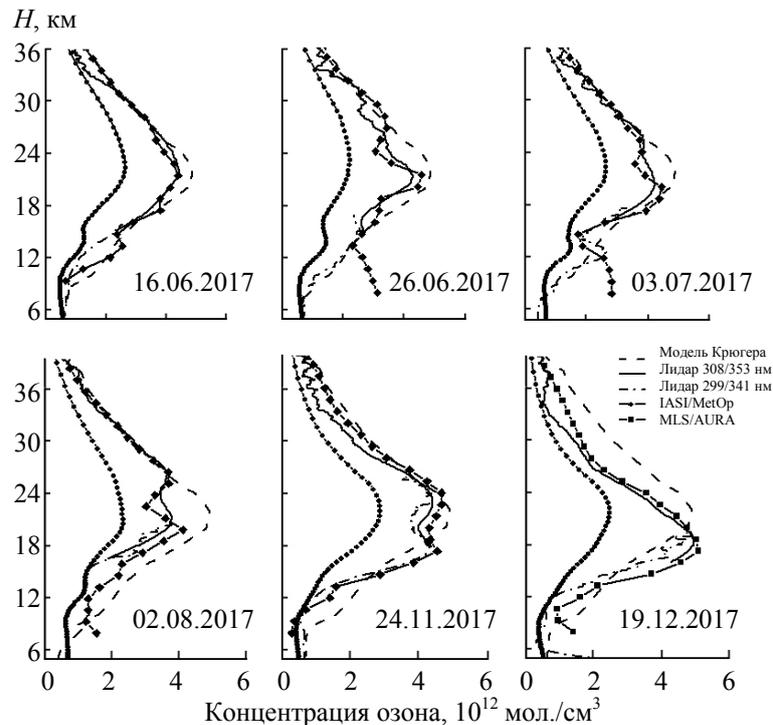


Рис. 5. Сопоставление вертикальных профилей озона верхней тропосферы—стратосферы со спутниковыми данными AURA и MetOp

На рис. 5 приведены некоторые общие ВРО, которые объединяют лидарный контроль стратосферы и верхней тропосферы—нижней стратосферы в шитый профиль ВРО. Такой комплексный подход к измерениям ВРО дает возможность более полно осуществлять лидарный контроль процессов стратосферно-тропосферного обмена воздушных масс. Видно хорошее согласие стратосферных лидарных и спутниковых AURA наблюдений.

Заключение. Создана лидарная система для измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере—стратосфере в высотном диапазоне ~5—45 км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. Следующим шагом модернизации лидарного комплекса является 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. Это позволит сократить время измерений вдвое и увеличить количество измерений. Последующий шаг — реализация зондирования неохваченных высот 0.1—5.0 км, что позволит контролировать всю озоносферу. Результаты сопоставления восстановленных лидарных профилей вертикального распределения озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере и стратосфере со спутниковыми профилями MLS/AURA и IASI/MetOp, а также шитый профиль вертикального распределения озона в верхней тропосфере—стратосфере в сравнении со среднеширотной моделью Крюгера подтверждают перспективность использования пар длин волн зондирования озона 299/341 и 308/353 нм. Восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных AURA, чем к модели Крюгера.

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

- [1] **Б. И. Васильев, У. М. Маннун.** Квант. электрон., **36**, № 9 (2006) 801—820
- [2] **В. Д. Бурлаков, С. И. Долгий, А. А. Невзоров, А. В. Невзоров, О. А. Романовский.** Изв. ВУЗов. Физика, **58**, № 8 (2015) 70—76
- [3] **О. А. Романовский, С. А. Садовников, О. В. Харченко, С. В. Яковлев.** Журн. прикл. спектр., **85**, № 3 (2018) 448—452 [**O. A. Romanovskii, S. A. Sadovnikov, O. V. Kharchenko, S. V. Yakovlev.** J. Appl. Spectr., **85** (2018) 457—461]
- [4] **L. T. Molina, M. T. Molina.** J. Geophys. Res., **91**, N D13 (1988) 14.501—14.508
- [5] **E. Galani, D. Balis, P. Zanis, C. Zerefos, A. Papayannis, H. Wernli, E. Gerasopoulo.** J. Geophys. Res., **108**, N D12 (2003) STA12-1-STA12-10
- [6] **M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai, Y. Hirose.** App. Opt., **46**, N 12 (2007) 2269—2279
- [7] **В. С. Букреев, С. К. Вартапетов, И. А. Веселовский, Ю. С. Шаблин.** Квант. электрон., **23**, № 4 (1996) 363—367
- [8] **H. Eisele, H.E. Scheel, R. Sladkovic, T. Trickl.** J. Atm. Sci., **56**, N 3 (1999) 319—330
- [9] **V. D. Burlakov, S. I. Dolgii, A. P. Makeev, A. V. Nevzorov, O. A. Romanovskii, O. V. Kharchenko.** Instrum. Exper. Techniq., **53**, N 6 (2010) 886—889
- [10] Сибирская лидарная станция: аппаратура и результаты, Томск, изд-во ИОА СО РАН (2016)
- [11] **А. А. Невзоров, В. Д. Бурлаков, С. И. Долгий, А. В. Невзоров, О. А. Романовский, О. В. Харченко, Ю. В. Гриднев.** Опт. атм. и океана, **29**, № 8 (2016) 703—708
- [12] **H. Zhang, S. Wu, Y. Huang, Y. Wang.** Atm. Chem. Phys., **14**, N 8 (2014) 4079—4086
- [13] **G. Kirgis, T. Leblanc, I. S. McDermid, T. D. Walsh.** Atm. Chem. Phys., **13**, 9 (2013) 5033—5047
- [14] **S. I. Dolgii, A. A. Nevzorov, A. V. Nevzorov, O. A. Romanovskii, O. V. Kharchenko.** Remote Sensing, **9**, N 5 (2017) 447
- [15] **V. Gorshchev, A. Serdyuchenko, M. Weber, W. Chehade, J. P. Burrows.** Atm. Meas. Technol., **7**, N 2 (2014) 609—624
- [16] **A. Serdyuchenko, V. Gorshchev, M. Weber, W. Chehade, J. P. Burrows.** Atm. Meas. Technol., **7**, N 2 (2014) 625—636
- [17] **А. В. Ельников, В. В. Зуев.** Опт. атм. и океана, **5**, № 10 (1992) 1050—1054
- [18] **T. August, D. Klaes, P. Schlüssel, T. Hultberg, M. Crapeau, A. Arriaga, A. O'Carroll, D. Coppens, R. Munro, X. Calbet.** J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **113**, N 11 (2012) 1340—1371
- [19] http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/PROMOTE_O3/
- [20] **A. J. Krueger, R. A. Minzner.** J. Geophys. Res., **81**, N D24 (1976) 4477—4481