

Лидарный комплекс для контроля озоносферы над Томском

А.А. Невзоров[✉], А.В. Невзоров, О.В. Харченко,
Н.С. Кравцова, Я.О. Романовский*

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

Поступила в редакцию 28.03.2024;
после доработки 06.05.2024;
принята к печати 07.06.2024

Озон является сильнейшим окислителем, поэтому контроль состояния озоносферы — одна из важнейших задач обеспечения безопасности жизни и здоровья человека. Для исследования озона существует ряд методов, среди которых особое место занимает лидарный метод дистанционного обнаружения и идентификации с использованием селективного поглощения лазерного излучения, обладающий максимальной чувствительностью. В ИОА СО РАН решили задачу контроля всей озоносферы над Томском с помощью объединения действующих лидарных систем — трех лидарных систем Сибирской лидарной станции и мобильного озонowego лидара — в новый лидарный комплекс для зондирования озона в расширенном диапазоне высот от 0,1 до 45 км. Комплекс позволяет исследовать озоносферу методом дифференциального поглощения и рассеяния, а также аэрозольные поля методом однократного упругого рассеяния. В лидарном комплексе используются Nd:YAG-лазеры фирм SOLAR и LOTIS III, ХеСl-лазер фирмы Lambda Physik, а также приемные телескопы системы Кассегрена диаметром 0,35 м и Ньютона диаметром 0,5 м. Лидары работают в режиме счета фотонов и регистрируют сигналы с пространственным разрешением от 1,5 до 160 м на длинах волн зондирования 299/341 нм на высотах ~ 0,1–12 и ~ 5–20 км, а также на длинах волн 308/353 нм в диапазоне высот ~ 15–45 км. В статье представлены результаты восстановления вертикального профиля концентрации озона. Впервые в России выполнены измерения озона от приземного слоя до 45 км на базе нового лидарного комплекса, сформированного из трех лидаров. Результаты работы лидарного комплекса могут быть использованы для корректировки квазитрехлетней модели вертикального распределения концентрации озона и аэрозоля, для сопоставления лидарных и спутниковых данных, оценки влияния климатообразующих факторов на атмосферу Западной Сибири.

Ключевые слова: атмосфера, лазер, лидар, лидарное зондирование, озон; atmosphere, laser, lidar, lidar sensing, ozone.

Введение

Малые газовые составляющие атмосферы, к которым относятся водяной пар, углекислый газ, озон, окислы азота и серы, угарный газ и целый ряд других, являются оптически активными компонентами атмосферы и оказывают большое воздействие: на погодообразование, загрязнение воздушного бассейна индустриальными выбросами, трансформацию солнечного излучения, распространение оптических волн [1]. Основные климатообразующие факторы с точки зрения радиационного баланса атмосферы — облачные и аэрозольные поля, а также парниковые газы, прежде всего озон и газовые составляющие

озоновых циклов [1]. Примерно 85% озона расположено на высотах стратосферы от 15 до 45 км. Он регенерирует из молекулярного кислорода посредством присоединения к его молекуле атомарного кислорода под воздействием ультрафиолетового (УФ) излучения Солнца. Для исследования этого газа существует ряд методов, среди которых особое место занимает метод дифференциального поглощения [2, 3], обладающий необходимой чувствительностью для контроля концентрации газовых компонент.

В значительных пространственных масштабах и в относительно малые сроки вертикальное распределение озона (ВРО) восстанавливают на основе данных действующих лидарных станций, расположенных по всему миру, например входящих в состав сети NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) [4]. Отдельно стоит отметить лидарные системы на мобильных платформах, такие как TOLNet (Tropospheric Ozone Lidar Network) [5], которые, как правило, работают

* Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Наталья Сергеевна Кравцова (kravtsova@iao.ru); Ярослав Олегович Романовский (romanovskii.io17@physics.msu.ru).

в группе в рамках исследовательских кампаний. Использование лидаров позволяет проводить сопоставления со спутниковыми приборами, когда сравнения с эталоном (озон-зондом) для валидации недоступны.

Часть действующих по всему миру лидарных станций охватывает стратосферу, тропосферу и приземный слой: Arctic Stratospheric Observatory (AStrO), Канада [6]; Афины, Греция [7]; Пекин, Китай [8, 9]; ст. Eureka, Канада [10]; Центр космических полетов Годдарда (GSFC), США [11, 12]; Хефей, Китай [13, 14]; ст. Lauder, Новая Зеландия [15];

обсерватория Мауна-Лоа (MLO), Гавайи, США [16]; обсерватория Майдо, остров Реюньон, Франция [17, 18]; обсерватория Верхнего Прованса (ОНР), Франция [19, 20]; Цукуба, Япония [21, 22]; Троицк, Россия [23]; Столовая гора (ТМФ), США [24, 25]; Сибирская лидарная станция (СЛС) Томск, Россия [26, 27]; Владивосток, Россия [28]; обсерватория Yangbajing, Китай [29]. Для получения информативных длин волн зондирования озона все представленные в табл. 1 лидарные системы используют ячейку вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР).

Таблица 1

Основные характеристики действующих лидарных систем

Станция или город	Координаты	Лазер	Длина волны накачки, нм	ВКР-ячейка	Пары длин волн, нм	Высотный диапазон, км	Погрешность, %	Диаметр зеркала, м
AStrO [6]	80° с.ш., 86° з.д.	XeCl	308	H ₂	308/353	10–35	5–30	1
Афины [7]	37,97° с.ш., 23,71° в.д.	Nd:YAG	266	D ₂	266/289 289/299 289/316	0,5–2,7	10 35 65	0,25
Пекин [8, 9]	39,90° с.ш., 116,39° в.д.	Nd:YAG XeCl Nd:YAG	266 308 355	D ₂ H ₂ –	289/299 308/355	0,15–3 10–35	10 5–30	0,4 0,2
Eureka [10]	80° с.ш., 86° з.д.	Nd:YAG	266	CO ₂	276/287 287/299	0,5–1,8 0,5–3,5	10 10	0,2
GSFC [11, 12]	37,1° с.ш., 76,39° з.д.	Nd:YAG XeCl Nd:YAG	266 308 355	D ₂ H ₂ –	289/299 308/355	1,5–12 10–50	16–19 5–30	0,45 0,76
Хефей [13, 14]	31,82° с.ш., 117,22° в.д.	Nd:YAG XeCl	266 308	H ₂ D ₂ CH ₄	308/353 299/288 289/308	18–40 0,5–2 4–18	5–30 10 25	0,3 0,62
Lauder [15]	45,0° ю.ш., 169,7° в.д.	XeCl	308	H ₂	308/353	10–48	5–30	0,6
MLO [16]	19,5° с.ш., 155,6° з.д.	XeCl Nd:YAG	308 355	H ₂ –	308/353	15–55	5–30	1
Майдо [17, 18]	21° ю.ш., 55° в.д.	Nd:YAG XeCl Nd:YAG	266 308 355	D ₂ – –	289/316 308/355	6–17 15–45	20 5–30	4 шт. – 0,5
ОНР [19, 20]	43,94° с.ш., 5,71° в.д.	Nd:YAG XeCl Nd:YAG	266 308 355	D ₂ – –	289/316 308/355	3–14 15–45	10 5–20	4 шт. – 0,4 1 шт. – 0,53
Цукуба [21, 22]	36,05° с.ш., 140,13° в.д.	Nd:YAG	266	CO ₂	276/287	0,4–3	3–9	0,25
		XeCl	308		287/299	3–10	3–9	0,6
		Nd:YAG	355	D ₂	308/355	15–45	5–30	1
		XeF	351		308/351	10–45	5–30	1
				308/339	10–45	5–30	2	
Троицк [23]	54,09° с.ш., 61,57° в.д.	KrF XeCl	248 308	H ₂ D ₂	277/308 292/308	0,5–4,5 4–10	15 30	0,6
ТМФ [24, 25]	34,4° с.ш., 117,7° з.д.	Nd:YAG XeCl Nd:YAG	266 308 355	D ₂ H ₂ H ₂	289/299 308/353	3–18 15–50	7–14 5–30	0,91 0,9
СЛС [26, 27]	56,50° с.ш., 85,00° в.д.	Nd:YAG	266	H ₂	299/341	0,1–12	8–25	0,35
		Nd:YAG	266	H ₂	299/341	5–20	6–18	0,5
		XeCl	308	H ₂	308/353	15–45	5–35	
Владивосток [28]	43,3° с.ш., 132° в.д.	XeCl	308	H ₂	308/353/331	5–40	2–30	0,6
Yangbajing [29]	30°5' с.ш., 90°33' в.д.	Nd:YAG	266	D ₂	289/299	5–10 8–19	< 30 < 30	4 шт. – 1,25
			308	H ₂	308/355	19–32 32–50	< 30 > 30	4 шт. – 0,21 1 шт. – 1
		XeCl	308	H ₂	308/355	19–32 32–50	< 30 > 30	
			308					

Как видно из табл. 1, лидарные системы включают в себя как эксимерные лазеры для зондирования стратосферных высот, так и твердотельные генераторы когерентного излучения для охвата тропосферы. Измерения проводятся лишь в отдельных высотных диапазонах. Кроме СЛС, ни одна из существующих станций не позволяет получить непрерывный профиль озона до высоты 45 км. СЛС позволяет комплексно изучать процессы, протекающие во всем озоновом слое.

Цель работы – тестирование уникального для России лидарного комплекса СЛС, способного исследовать озоносферу над Томском в высотном диапазоне от 0,1 до 45 км.

Лидарные системы

Для изучения особенностей ВРО в верхней тропосфере – стратосфере, особенно в области локализации озонового слоя, и отслеживания его сезонной изменчивости создан лидар на длинах волн 299/341 и 308/353 нм [26] (рис. 1). Он позволяет получать данные о состоянии озонового слоя в диапазоне высот от ~ 5 до ~ 45 км.

Лидарный комплекс СЛС использует один телескоп и два импульсных лазера (эксимерный ХеСl и Nd:YAG). В зависимости от цели зондирования – стратосферный озон (308/353 нм) или тропосферный озон (299/341 нм) – экспериментаторами устанавливается соответствующая оптика в кювете спектральной селекции.

Для покрытия неохваченных лидарным комплексом СЛС высот и исследования особенностей

ВРО в высотном диапазоне ~ 0,1–12 км, а также отслеживания сезонной изменчивости и изучения влияния процессов стратосферно-тропосферного обмена на приземный слой действует мобильный лидар с длинами волн зондирования 299 и 341 нм [27]. Такой мобильный лидар – единственный в России. На рис. 2 показана его блок-схема. Основные технические характеристики нового озонового лидарного комплекса приведены в табл. 2.

Длительность измерения стратосферного озона лидарным комплексом СЛС с пространственным разрешением 50 м составляет ~ 30–40 мин. Процесс замены оптики кюветы спектральной селекции для приема обратнорассеянного излучения из атмосферы на другой паре длин волн зондирования производится за 5 мин. Время измерения озона на длинах волн 299/341 нм с пространственным разрешением 10 м составляет ~ 40 мин. Старт зондирования тропосферы мобильным лидаром совпадает со стартом работы лидарного комплекса СЛС после его перестройки на длины волн 299/341 нм. Длительность записи одного файла мобильного лидара с пространственным разрешением 1,5 м – 5 мин. Первые измерения проводятся стратосферным лидаром, работающим на длинах волн 308/353 нм. Далее ведутся измерения тропосферы мобильным и стационарным лидарами, работающими на длинах волн 299/341 нм. Как правило, лидарные измерения начинаются в 16:00–19:00 по Гринвичу (GTM) в условиях безоблачного неба. Общее время лидарных измерений всей озоносферы ~ 1,5 ч. Например, 11.04.2023 г. общее время измерений составило 1 ч 49 мин, 23.04.2023 г. – 1 ч 27 мин.

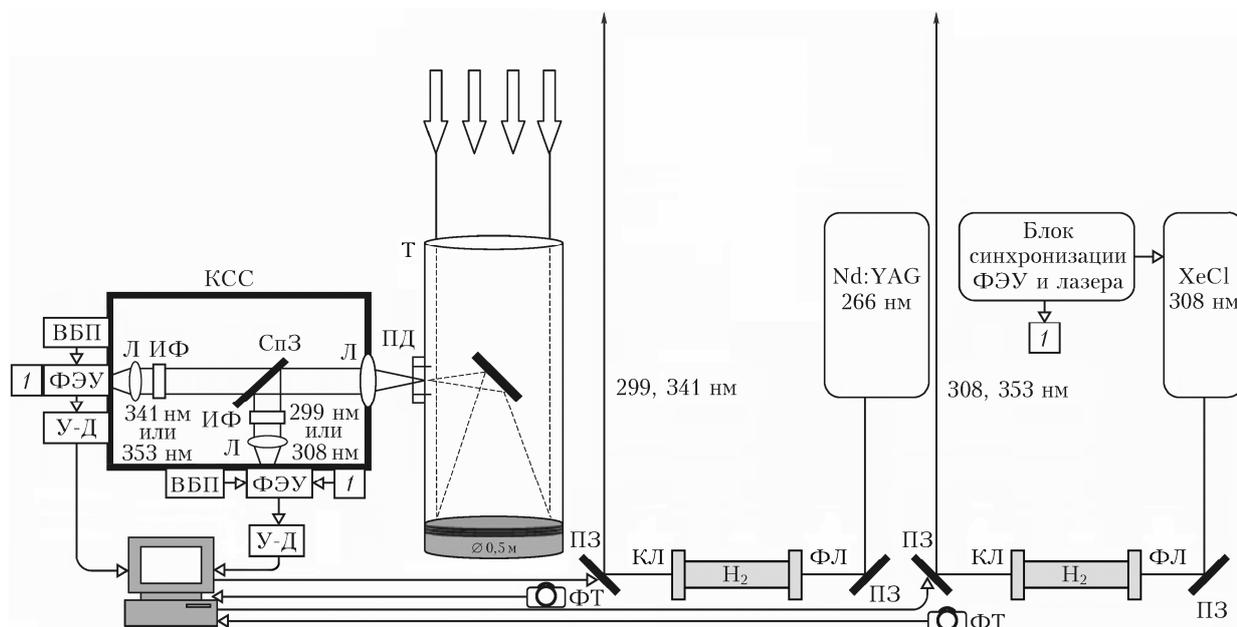


Рис. 1. Блок-схема лидарного комплекса СЛС: 1 – сигнал управления блоками ФЭУ; ФЭУ – модули фотоэлектронных умножителей; Nd:YAG и ХеСl – лазерные источники; Л – линзы; H₂ – ВКР-ячейка с водородом; ПЗ – поворотные зеркала; Т – приемный телескоп, собранный по схеме Ньютона, с приемным зеркалом диаметром 0,5 м; ПД – полевая диафрагма; КСС – кювета спектральной селекции с ФЭУ; СпЗ – спектроразделительное зеркало; ИФ – интерференционные фильтры; У-Д – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; СФ – счетчик фотонов РНcount6/2; ФТ – фототранзистор; ВБП – высоковольтный блок питания; ФЛ – фокусирующая линза; КЛ – коллимирующая линза

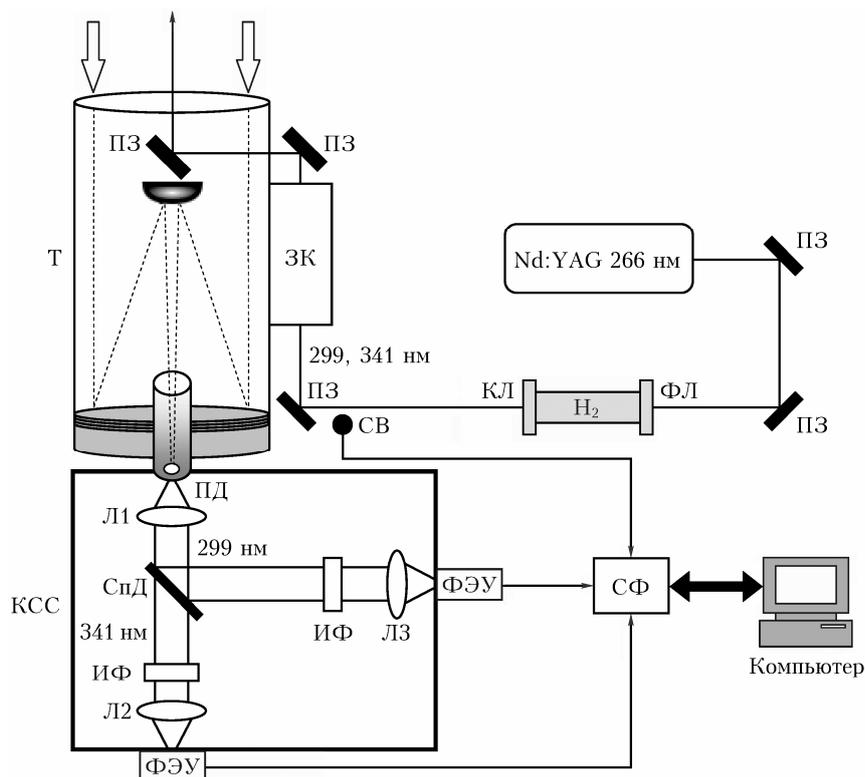


Рис. 2. Блок-схема мобильного озонного лидара: Н₂ – ВКР-ячейка с водородом, оборудованная линзами; ЗК – зеркальный коллиматор; Т – приемный телескоп, собранный по схеме Кассегрена с главным зеркалом диаметром 0,35 м; КСС – кювета спектральной селекции, оборудованная линзами; СпД – спектроделительное зеркало; СФ – счетчик фотонов PHCOUNT_4E; СВ – световод для запуска счетчика фотонов; Компьютер – персональный компьютер для сбора и хранения получаемой информации

Т а б л и ц а 2

Основные технические характеристики нового озонного лидарного комплекса

Параметр	Мобильный лидар	Лидарный комплекс СЛС	
Передатчик	SOLAR QX 500	LOTIS ТП	LPX-120i
Длина волны излучения лазера, нм	266	266	308
Система охлаждения	Воздушная	Водяная	Водяная
Энергия импульса, мДж	до 25	до 25	до 200
Давление в ячейке вынужденного комбинационного рассеяния с водородом, атм	2	2	10
Длина волны зондирования, нм	299/341	299/341	308/353
Частота следования, Гц (соотв. λ)	20/20	15/15	100/100
Длительность импульса, нс	10	5–6	25–27
Зеркальный коллиматор	Пятикратный (× 5)	–	–
Расходимость, мрад	0,2	0,5	2,5
Приемник	Телескоп Кассегрена	Телескоп Ньютона	
Диаметр зеркала, м	0,35	0,5	
Фокусное расстояние, м	0,7	1,5	
Счетчик фотонов	PHCOUNT_4E	PHcount6/2	
Каналы приема, шт.	4	2	
Каналы регистрации переполнения, шт.	4	2	
Скорость счета, МГц на канал	200	200	
Входной импеданс, Ом	50	50	
Синхронизация	Transistor Transistor Logic (TTL) сигнал с частотой до 10 кГц либо оптический сигнал	Оптический сигнал	
Пространственное разрешение, м	1,5–150	10–160	
Интерфейс связи с персональным компьютером	Ethernet, Wi-Fi	Ethernet	
Высотный диапазон, км	~ 0,1–12	5–20	15–45
ФЭУ Hamamatsu	H12386-210, 2 шт.	R7207-01, 2 шт.	

Результаты и обсуждение

С помощью созданного нами лидарного комплекса в апреле 2023 г. был выполнен ряд натурных измерений озоносферы над Томском с пространственным разрешением 50 м. Измерения проводились в безоблачные дни в ночное время. На основе данных эксперимента решена обратная задача и выполнено восстановление профилей концентрации озона. Методом однократного упругого рассеяния восстанавливается отношение рассеяния, которое используется в аэрозольной коррекции, применение которой детально представлено в работе [30]. Результат объединения трех лидарных систем при измерении вертикального распределения концентрации озона в виде профиля с погрешностью восстановления, а также модель Крюгера [31] представлены на рис. 3. Погрешность восстановления рассчитывалась по методике из работы [32]. Пример восстановленного профиля отношения рассеяния показан на рис. 4.

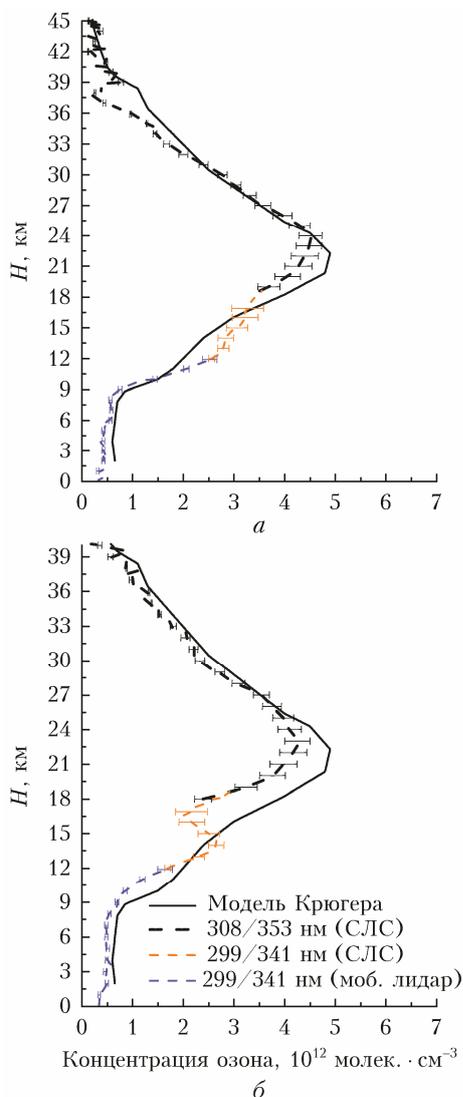


Рис. 3. Восстановленные профили вертикального распределения концентрации озона: 17:06–18:55 11.04.2023 г. (а), 16:29–17:56 23.04.2023 г. (б)

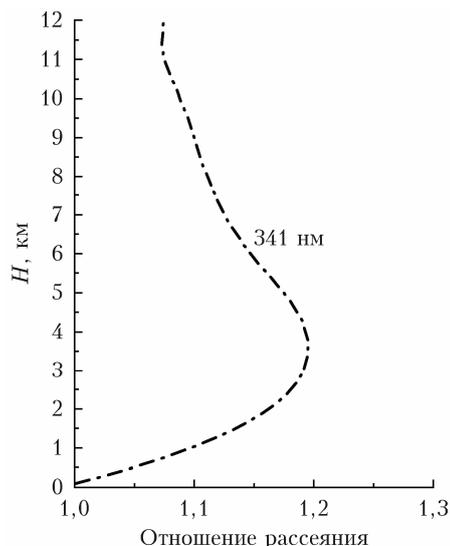


Рис. 4. Восстановленный профиль отношения рассеяния на основании данных измерений мобильного лидара 11.04.2023 г.

Как видно из рис. 3, восстановленный профиль озоносферы близок к модели Крюгера. Отдельные участки восстановленных профилей продолжают соседние, что доказывает эффективность объединения трех лидарных систем в один лидарный комплекс. Ранее мы сопоставили лидарные и спутниковые данные Aura, MetOp на высотах стратосферы (15–45 км) и верхней тропосферы – стратосферы (5–20 км) [33]. Результаты сопоставления показали хорошее согласование лидарных и спутниковых данных для обоих спутников.

Заключение

Для решения задачи контроля озоносферы в высотном диапазоне от 0,1 до 45 км создан новый лидарный комплекс на базе объединения трех лидарных систем СЛС и мобильного лидара, который позволяет получать лидарные сигналы с пространственным разрешением от 1,5 до 160 м. Погрешность измерений вертикального распределения концентрации озона изменяется от 7,8% на высоте 0,1 км до 22% на высоте 12 км, в диапазоне 12–20 км погрешность увеличивается от 8,1 до 17% и от 4,1 до 9% на высотах 16–45 км. Такой лидарный комплекс по измерению озона является уникальным устройством для контроля озоносферы в Томске. Результаты натурных экспериментов подтверждают его эффективность.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 21-79-10051, <https://rscf.ru/project/21-79-10051/>).

Список литературы

1. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 1. Свойства и роль в природных и техногенных процессах // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 299–322.
2. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 2. Методы и средства измерения // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 5. С. 397–424.

3. *Measures R.M.* Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
4. *Hassler B., Petropavlovskikh I., Staehelin J., August T., Bhartia P.K., Clerbaux C., Degenstein D., Mazière M. De, Dinelli B.M., Dudhia A., Dufour G., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Granville J., Harris N.R.P., Hoppel K., Hubert D., Kasai Y., Kurylo M.J., Kyrölä E., Lambert J.-C., Levett P.F., McElroy C.T., McPeters R.D., Munro R., Nakajima H., Parrish A., Raspollini P., Remsberg E.E., Rosenlof K.H., Rozanov A., Sano T., Sasano Y., Shiotani M., Smit H.G.J., Stiller G., Tamminen J., Tarasick D.W., Urban J., van der A R.J., Veefkind J.P., Vigouroux C., von Clarmann T., von Savigny C., Walker K.A., Weber M., Wild J., Zawodny J.M.* Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 5. P. 1395–1427. DOI: 10.5194/amt-7-1395-2014.
5. *Leblanc T., Brewer M.A., Wang P.S., Granados-Muñoz M.J., Strawbridge K.B., Travis M., Firanski B., Sullivan J.T., McGee T.J., Sunnicht G.K., Twigg L.W., Berkoff T.A., Carrion W., Gronoff G., Aknan A., Chen G., Alvarez R.J., Langford A.O., Senff C.J., Kirgis G., Johnson M.S., Kuang Shi, Newchurch M.J.* Validation of the TOLNet lidars: The Southern California Ozone Observation Project (SCOOP) // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11, N 11. P. 6137–6162. DOI: 10.5194/amt-11-6137-2018
6. *Carswell A.I., Pal S.R., Steinbrecht W., Whiteway J.A., Ulitsky A., Wang T.Y.* Lidar measurements of the middle atmosphere // *Can. J. Phys.* 1991. V. 69. P. 1076–1086.
7. *Mytilinaios M., Papayannis A., Tsaknakis G.* Lower-free tropospheric ozone DIAL measurements over Athens, Greece // *EPJ Web Conf.* 2018. V. 176. P. 05025. DOI: 10.1051/epjconf/201817605025.
8. *Yang L., Qiu J., Zheng S., Xia Q., Huang Q., Wang W., Pan J.* Lidar measurement of aerosol, ozone and clouds in Beijing // *Proc. SPIE.* 2003. V. 4893. P. 45–51. DOI: 10.1117/12.466457.
9. *Chen Z., Zhang J., Zhang T., Liu W., Liu W.* Haze observations by simultaneous lidar and WPS in Beijing before and during APEC, 2014 // *Sci. China Chem.* 2015. V. 58. P. 1385–1392. DOI: 10.1007/s11426-015-5467-x.
10. *Seabrook J., Whiteway J.* Influence of mountains on Arctic tropospheric ozone // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121. P. 1935–1942. DOI: 10.1002/2015JD024114.
11. *Steinbrecht W., McGee T.J., Twigg L.W., Claude H., Schönenborn F., Sunnicht G.K., Silbert D.* Intercomparison of stratospheric ozone and temperature profiles during the October 2005 Hohenpeißenberg Ozone Profiling Experiment (HOPE) // *Atmos. Meas. Tech.* 2009. V. 2. P. 125–145. DOI: 10.5194/amt-2-125-2009.
12. *Sullivan J.T., McGee T.J., Sunnicht G.K., Twigg L.W., Hoff R.M.* A mobile differential absorption lidar to measure sub-hourly fluctuation of tropospheric ozone profiles in the Baltimore–Washington, D.C. region // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7. P. 3529–3548. DOI: 10.5194/amt-7-3529-2014.
13. *Shunxing H., Huanling H., Yonghua W., Jun Zh., Qi Fudi, Yue Guming.* Atmospheric ozone measured by differential absorption lidar over Hefei // *Proc. SPIE.* 2003. V. 4893. DOI: 10.1117/12.466591.
14. *Liu X., Zhang Y., Hu H., Tan K., Tao Z., Shao Sh., Cao K., Fang X., Yu Sh.* Mobile lidar for measurements of SO₂ and O₃ in the low troposphere // *Proc. SPIE.* 2005. V. 5832. DOI: 10.1117/12.619553.
15. *Brinksma E.J., Swart D.P.J., Bergwerff J.B., Meijer Y.J., Ormel F.T.* RIVM stratospheric ozone lidar at NDSC station lauder: Routine measurements and validation during the OPAL campaign // *Adv. Atmos. Remote Sens. Lidar.* 1996. P. 529–532. DOI: 10.1007/978-3-642-60612-0_128.
16. *McDermid I.S., Walsh D.T., Deslis A., White M.L.* Optical systems design for a stratospheric lidar system // *Appl. Opt.* 1995. V. 34. P. 6201–6210. DOI: 10.1364/AO.34.006201.
17. *Portafaix T., Godin-Beekmann S., Payen G., de Mazière M., Langerock B., Fernandez S., Posny F., Cammas J.P., Metzger J.M., Bencherif H., Vigouroux C., Marquestaut N.* Ozone profiles obtained by DIAL technique at Maïdo Observatory in La Reunion Island: Comparisons with ECC ozone sondes, ground-based FTIR spectrometer and microwave radiometer measurements // *The 27th International Laser Radar Conference (ILRC 27).* 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.3061.0403.
18. *Baray J.-L., Courcoux Y., Keckhut P., Portafaix T., Tulet P., Cammas J.-P., Hauchecorne A., Godin-Beekmann S., De Mazière M., Hermans C., Desmet F., Sellegri K., Colomb A., Ramonet M., Sciare J., Vuillemin C., Hoareau C., Dionisi D., Duflot V., Vèrèmes H., Porteneuve J., Gabarrot F., Gaudo T., Metzger J.-M., Payen G., Leclair de Bellevue J., Barthe C., Posny F., Ricaud P., Abchiche A., Delmas R.* Maïdo observatory: A new high-altitude station facility at Reunion Island (21°S, 55°E) for long-term atmospheric remote sensing and in situ measurements // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 2865–2877. DOI: 10.5194/amt-6-2865-2013.
19. *Godin S., Bergeret V., Bekki S., David C., Mégie G.* Study of the interannual ozone loss and the permeability of the Antarctic Polar Vortex from aerosol and ozone lidar measurements in Dumont d'Urville (66.4°, 140°S) // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 1311–1330. DOI: 10.1029/2000JD900459.
20. *Gaudel A., Ancellet G., Godin-Beekmann S.* Analysis of 20 years of tropospheric ozone vertical profiles by lidar and ECC at Observatoire de Haute Provence (OHP) at 44°N, 6.7°E // *Atmos. Environ.* 2015. V. 113. P. 78–89. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.04.028.
21. *Park Ch.B., Nakane H., Sugimoto N., Matsui Ich., Sasano Y., Fujinuma Y., Ikeuchi Iz., Kurokawa J.-Ich., Furuhashi N.* Algorithm improvement and validation of National Institute for Environmental Studies ozone differential absorption lidar at the Tsukuba Network for Detection of Stratospheric Change complementary station // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. P. 3561–3576. DOI: 10.1364/AO.45.003561.
22. *Nakazato M., Nagai T., Hirose Y.* Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide // *Appl. Opt.* 2007. V. 46. P. 2269–2279. DOI: 10.1364/AO.46.002269.
23. *Veselovskii I., Barchunov B.* Excimer-laser-based lidar for tropospheric ozone monitoring // *Appl. Phys.* 1999. V. 68. P. 1131–1137. DOI: 10.1364/AO.46.002269.
24. *McDermid I.S., Godin S.M., Lindquist L.O.* Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone // *Appl. Opt.* 1990. V. 29. P. 3603–3612. DOI: 10.1364/AO.29.003603.
25. *McDermid I.S., Beyerle G., Haner D.A., Leblanc T.* Redesign and improved performance of the tropospheric ozone lidar at the Jet Propulsion Laboratory Table Mountain Facility // *Appl. Opt.* 2002. V. 41. P. 7550–7555. DOI: 10.1364/AO.41.007550.

26. Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Makeev A.P., Романовский О.А., Харченко О.В. Лидарный комплекс для измерения вертикального распределения озона в верхней тропосфере – стратосфере // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 9. С. 764–770. DOI: 10.15372/AOO20180911; Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Makeev A.P., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Lidar complex for measurement of vertical ozone distribution in the upper troposphere – stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 702–708.
27. Невзоров А.А., Невзоров А.В., Харченко О.В., Кравцова Н.С., Романовский Я.О. Мобильный лидар для зондирования тропосферного озона // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 5. С. 410–416. DOI: 10.15372/AOO20230512; Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Kravtsova N.S., Kharchenko O.V., Romanovskii Ya.O. Mobile lidar for sensing tropospheric ozone // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 5. P. 562–568.
28. Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А., Букин О.А. Лидарные исследования изменчивости вертикального распределения озона под влиянием процессов стратосферно-тропосферного обмена в Дальневосточном регионе // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 788–795; Pavlov A.N., Stolyarchuk S.Yu., Shmirko K.A., Bukin O.A. Lidar measurements of variability of the vertical ozone distribution caused by the stratosphere–troposphere exchange in the Far East Region // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 2. P. 126–134.
29. Fang X., Li T., Ban C., Wu Z., Li J., Li F., Cen Y., Tian B. A mobile differential absorption lidar for simultaneous observations of tropospheric and stratospheric ozone over Tibet // Opt. Express. 2019. V. 27. P. 4126–4139. DOI: 10.1364/OE.27.004126.
30. Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Intercomparison of ozone vertical profile measurements by differential absorption lidar and IASI/MetOp satellite in the upper troposphere – lower stratosphere // Remote Sens. 2017. V. 9, N 5. P. 447. DOI: 10.3390/rs9050447.
31. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // J. Geophys. Res. 1976. V. 81, N D24. P. 4477. DOI: 10.1029/JC081i024p04477.
32. Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Makeev A.P., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Estimation of the spatial resolution influence on the retrieval error of ozone profiles at the Siberian lidar station // Proc. SPIE. 2021. V. 11916. P. 119163H. DOI: 10.1117/12.2603276.
33. Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Comparison of ozone vertical profiles in the upper troposphere – stratosphere measured over Tomsk, Russia (56.5°N, 85.0°E) with DIAL, MLS, and IASI // Int. J. Remote Sens. 2020. V. 41, N 22. P. 8590–8609. DOI: 10.1080/01431161.2020.1782506.

A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov, N.S. Kravtsova, O.V. Kharchenko, Ya.O. Romanovskii. Lidar complex for monitoring the ozonosphere over Tomsk.

Ozone is a strong oxidizer, so monitoring the state of the ozonosphere is one of the most important tasks in ensuring the safety of human life and health. There are a number of methods for studying ozone, among which a special place is occupied by the lidar method of remote detection and identification using selective absorption of laser radiation due to its has maximal sensitivity. V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences solved the problem of monitoring the entire ozonosphere over Tomsk by combining existing lidar systems: three measuring systems of the Siberian Lidar Station and a mobile ozone lidar. Lidars are designed to study the ozonosphere using the method of differential absorption and scattering, as well as to study aerosol fields using single elastic scattering. The systems are based on SOLAR and LOTIS TII Nd:YAG lasers, a Lambda Physik laser, and receiving Cassegrain (0,35 m diameter) and Newton (0,5 m diameter) telescopes. Lidars operate in the photon counting mode and record lidar signals with a spatial resolution of 1.5 to 160 m at probing wavelengths of 299/341 nm in the altitude ranges ~ 0.1–12 km and ~ 5–20 km, and 308/353 nm in the altitude range ~ 15–45 km. By combining three measuring systems, a full-scale experiment of lidar sensing of the atmosphere in Tomsk was carried out. The result of retrieval of the vertical profile of ozone concentration is presented. For the first time in Russia, lidars have covered the entire ozonosphere. The lidar complex sounding results will be used in the network of Roshydromet stations, in adjusting the quasi-three-year model of the vertical distribution of ozone concentration and aerosol, in comparison of lidar and satellite data, and in assessing the influence of climate-forming factors in Western Siberia.