

УДК 551.510.534

Вертикальное распределение озона в нижней стратосфере — верхней тропосфере по данным лидарного зондирования на Сибирской лидарной станции в 2023 г.

С.И. Долгий[✉], А.П. Макеев, А.В. Невзоров, А.А. Невзоров,
Н.С. Сальникова, О.В. Харченко*

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

Поступила в редакцию 18.06.2024;
после доработки 25.09.2024;
принята к печати 08.10.2024

Представлены результаты лидарных измерений вертикального распределения озона в нижней стратосфере — верхней тропосфере на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН над г. Томском в 2023 г. Показан годовой ход вертикального распределения озона и зарегистрированное 09.03.2023 г. повышенное содержание озона. Предполагается, что причиной этого увеличения в диапазоне высот 8–14 км стал довольно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс через тропопаузу. Результаты могут быть полезны специалистам в области физики и химии атмосферы, климатологии, охраны окружающей среды.

Ключевые слова: атмосфера, лидар, лидарное зондирование, озон, нижняя стратосфера, верхняя тропосфера, стратосферно-тропосферный перенос; atmosphere, lidar, lidar sensing, ozone, lower stratosphere, upper troposphere, stratospheric-tropospheric transport.

Введение

Озон является одной из важных малых составляющих атмосферы. Он защищает все живущее на Земле от губительного УФ-В-излучения Солнца. Его содержание на разных высотах зависит от различных факторов: фотохимии, динамического фактора и др. Для определения степени влияния каждого из них на содержание озона необходимо знать вертикальное распределение озона (ВРО) в атмосфере. В настоящее время для этого используется информация, получаемая контактными (озонозонды, самолетные измерения [1–4], ракеты) и дистанционными методами (спутники MetOp, SAGE II, TERRA и др., а также лидары, использующие лазерное излучение) [5, 6]. Все они удачно дополняют друг друга в исследованиях. Со второй половины 1980-х гг. для исследования озоносферы активно применяется лазерное зондирование [7–10]. Наиболее чувствительным среди лазерных методов является метод дифференциального поглощения [11].

Стратосферно-тропосферный обмен (СТО) — это двухсторонний процесс: когда он направлен

вверх, речь идет о тропосферно-стратосферном переносе, в противном случае — о стратосферно-тропосферном. Тропопауза, являющаяся границей между тропосферой и стратосферой, иногда становится проницаемой для обмена их свойствами (химическими, энергией), которые опосредованно влияют на глобальный климат. Эти два погодообразующих слоя атмосферы земли имеют существенные различия в радиационном режиме, вертикальном распределении температуры и химического состава [12].

Что касается тропосферы, то это самая плотная часть земной атмосферы, которая содержит почти весь водяной пар, здесь формируются облака и осадки. Это слой активного перемешивания, в котором температура, как правило, понижается с высотой. Нагревание воздуха в тропосфере происходит в основном из-за длинноволнового излучения, отраженного от поверхности земли. В стратосфере, находящейся выше тропосферы, почти нет водяного пара, но она содержит до 90% атмосферного озона. Воздух в этом слое нагревается вследствие поглощения молекулами озона ультрафиолетовой радиации. Для стратосферы, которая является слоем большой статической устойчивости, характерно в среднем понижение температуры с высотой [12].

Многие исследователи обозначают слой наиболее активного СТО как «верхняя тропосфера — самая нижняя стратосфера». Этот слой есть ключевая область атмосферы, где происходит перемешивание

* Сергей Иванович Долгий (dolgii@iao.ru); Андрей Павлович Макеев (map@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzorov@iao.ru); Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Наталья Сергеевна Сальникова (salnikova@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru).

стратосферных и тропосферных воздушных масс, влияющая в первую очередь на химию и радиационный форсинг атмосферы [13, 14].

Долговременные (с 1989 г.) регулярные исследования озона на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН в Томске показали, что наиболее значимая для изучения часть озоносферы находится в нижней стратосфере — верхней тропосфере. В этом диапазоне высот содержание озона зависит от фотохимии и динамического фактора. Здесь протекают слабо изученные процессы стратосферно-тропосферного обмена, деформации озоносферы струйными течениями, формирование тонкой «языковой» структуры озонового слоя. Из-за меньшей концентрации озона в нижней стратосфере — верхней тропосфере для таких исследований требуется большая концентрационная чувствительность лидарных измерений, т.е. измерения ВРО необходимо проводить в более коротковолновой области УФ-спектра, где сечение поглощения озоном больше.

Цель настоящей работы — анализ профилей вертикального распределения озона над г. Томском в 2023 г., результаты которого могут быть использованы для формирования модели ВРО и оценки экологического состояния атмосферы на территории Томской области.

Аппаратура и методы

Функционирующий на СЛС лидарный комплекс при зондировании озона методом дифференциального поглощения использует излучение эксимерного Хе—Cl-лазера ($\lambda_{\text{он}} = 308$ нм) и первую стоксовую компоненту его преобразования на основе

вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) в ячейке с водородом ($\lambda_{\text{off}} = 353$ нм) и позволяет получать профили ВРО в диапазоне 13–45 км, где сечение поглощения озоном $\sigma_{308} = 1,4 \cdot 10^{-19}$ см². Так как содержание озона в нижней стратосфере — верхней тропосфере меньше, то для измерения ВРО в этом диапазоне высот необходимо увеличение концентрационной чувствительности метода. В 2007 г. комплекс был дополнен лидаром на основе четвертой гармоники (266 нм) Nd:YAG-лазера в сочетании с техникой ВКР-преобразования ее в водороде: первая ($\lambda_{\text{он}} = 299$ нм) и вторая ($\lambda_{\text{off}} = 341$ нм) стоксовы компоненты. Это позволило получать данные по ВРО в диапазоне высот 5–20 км, где $\sigma_{299} = 4,4 \cdot 10^{-19}$ см² [15]. Блок-схема лидара представлена на рис. 1.

Лазерное излучение на $\lambda = 266$ нм после прохождения через ячейку с водородом для ВКР-преобразования ($\lambda_{\text{он}} = 299$ нм, $\lambda_{\text{off}} = 341$ нм) направляется в атмосферу. Обратнорассеянное излучение поступает в приемный телескоп, направляется в кювету спектральной селекции, где спектроделителем разделяется по каналам с $\lambda_{\text{он}}$ и λ_{off} , регистрируется ФЭУ и далее поступает в компьютер для хранения и дальнейшей обработки. Сигналы регистрируются в режиме счета фотоэлектронных импульсов. Сигнал от ближней зоны отрезается электронным управлением ФЭУ. Время накопления сигнала ~ 40 мин за один сеанс, строб — 100 м, погрешность измерения в диапазоне 5–20 км составляет 6–18%. За ночь обычно реализуется 1–2 сеанса при отсутствии метеорологической облачности в атмосфере. Подробное описание лидара и его технические характеристики приведены в [16].

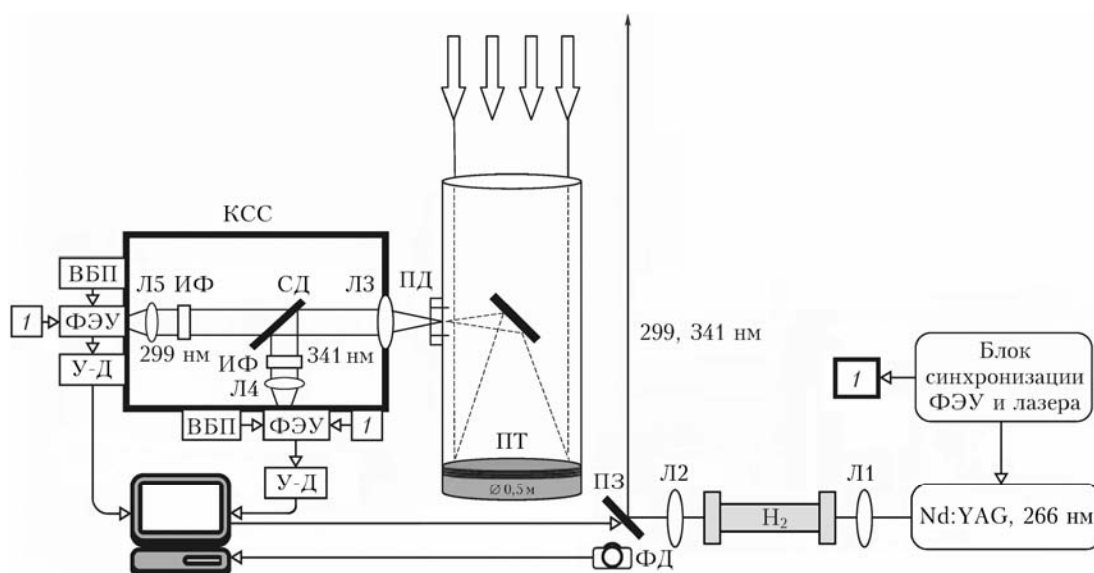


Рис. 1. Блок-схема лидара: Nd:YAG — твердотельный лазер; Н₂ — ячейка ВКР-преобразования с водородом; ПЗ — автоматизированное выходное поворотное зеркало; ПД — полевая диафрагма; Л1–Л5 — линзы; ИФ — интерференционные фильтры; ФЭУ — фотоэлектронные умножители; У-Д — усилители-дискриминаторы; ВБП — высоковольтные блоки питания ФЭУ; ФД — датчик запуска счетчика фотонов; КСС — кювета спектральной селекции; 1 — кабель соединения блока синхронизации ФЭУ и лазера; ПТ — приемный телескоп системы Ньютона с главным зеркалом диаметром 0,5 м; СД — спектроделитель

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены профили ВРО, полученные в 2023 г. на СЛС, в сравнении с моделью Крюгера [17]. Всего зарегистрировано 46 профилей озона. Из рис. 2 видно, что содержание озона повышено по сравнению с модельным распределением в январе — июне и понижено в июле — декабре. Отличие всех полученных профилей ВРО на высотах 9–14 км от модельного распределения является естественным для динамики ВРО в отдельные дни зондирования.

При зондировании 09.03.2023 г. (рис. 3, *а*) было зарегистрировано повышенное содержание озона в высотном диапазоне 8–14 км по сравнению с предыдущими и последующими днями измерений. Согласно [12] содержание озона в верхней тропосфере —

нижней стратосфере, среди других факторов, может являться трассером СТО, а низкая относительная влажность, которая не является стратосферным трассером, позволяет идентифицировать воздушную массу, как опустившуюся из стратосферы.

Для анализа причин повышения содержания озона 09.03.2023 г. использовались профили вертикального распределения температуры и влажности, полученные на основе данных аэрологического зондирования станций г. Колпашева и г. Новосибирска, как самых близко расположенных к г. Томску, с сайта <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Вертикальные профили температуры и относительной влажности воздуха, зарегистрированных на этих станциях, для выбранных дней схожи. Поэтому, чтобы не перегружать рис. 3, *б*, *в*, приведены данные только станции г. Колпашева.

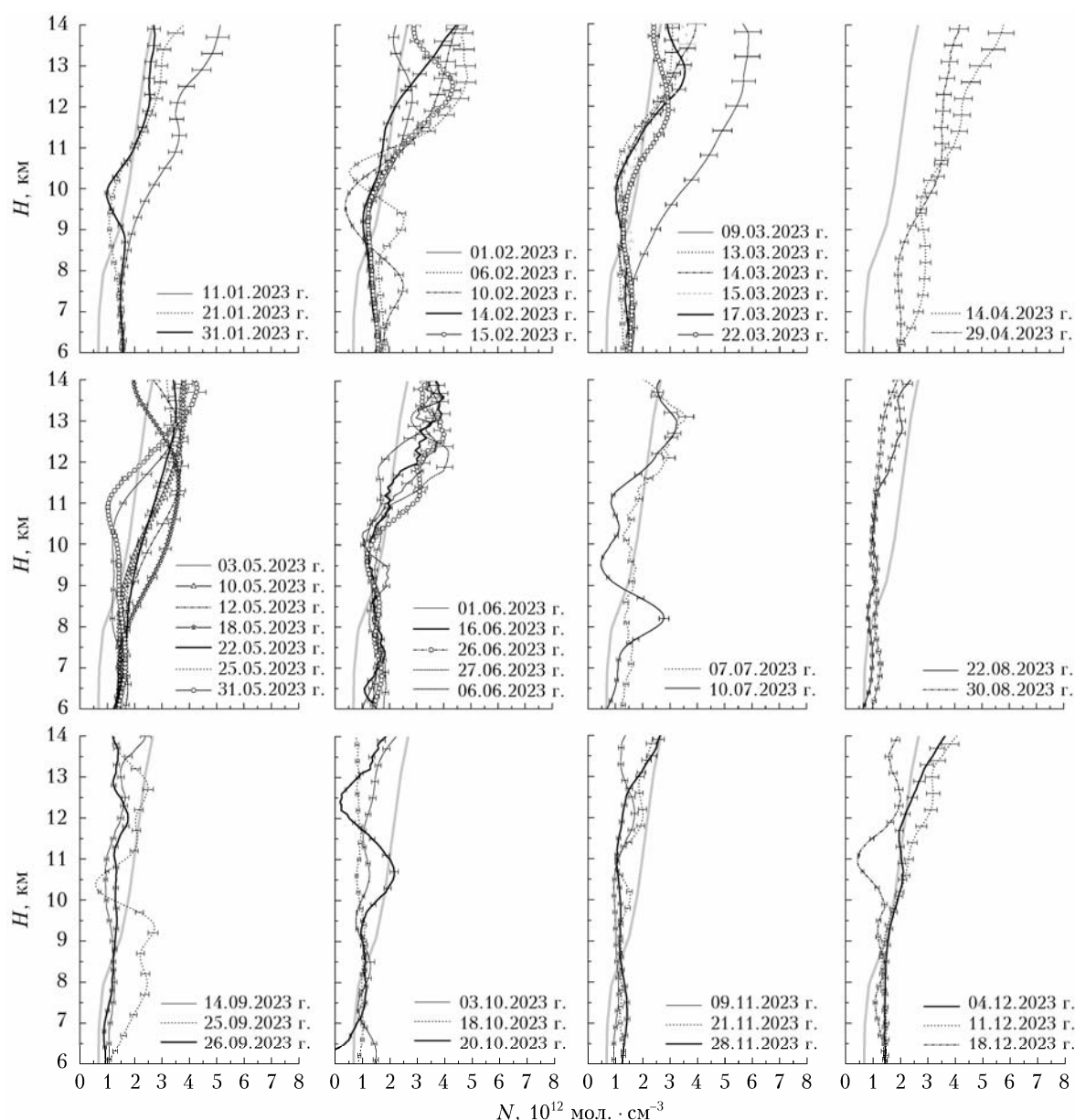


Рис. 2. Профили вертикального распределения концентрации озона N в 2023 г. над г. Томском; серая кривая — модель Крюгера

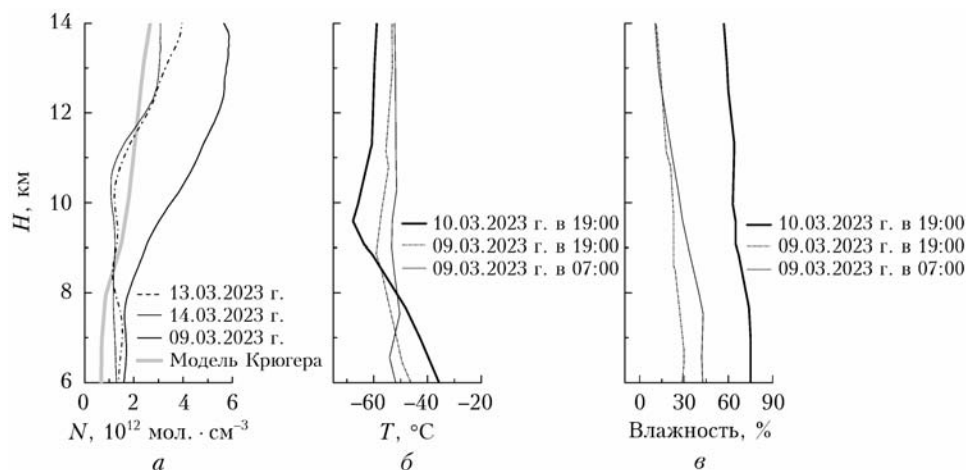


Рис. 3. Вертикальное распределение концентрации озона в атмосфере над Томском (56,5° с.ш., 85,0° в.д.) (а), температуры (б) и влажности (в) над Колпашево (58,3° с.ш., 83,0° в.д.) 09–14.03.2023 г., время местное

На профилях рис. 3, б видно, что при аэрозондировании было зарегистрировано «отсутствие» тропопаузы (практически вертикальное распределение температуры) 09.03.2023 г. в 07:00 и 19:00. Однако тропопауза отчетливо прослеживается на профиле температуры на высотах в районе 11 км 10.03 в 19:00. Также на профилях на рис. 3, в видно, что 09.03 в 07:00 и 19:00 наблюдалась пониженная относительная влажность воздуха в сравнении с ее значением 10.03 в 19:00. Таким образом, при зондировании ВРО 09.03.2023 г., вероятно, был зарегистрирован достаточно редкий процесс СТО.

Подобный результат был получен нами в апреле 2007 г. [18]. Регистрация таких случаев, происходящих в атмосфере, важна для исследования процессов стратосферно-тропосферного взаимодействия, их влияния на изменение климата, перенос воздушных масс в атмосфере, изменение химического состава воздуха, баланс радиационных потоков в нижней стратосфере – верхней тропосфере (проект STACCATO) [19].

Заключение

Зондирование вертикального распределения озона на Сибирской лидарной станции Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в 2023 г. показало увеличение содержания озона в период с января по июнь и его уменьшение с июля по декабрь, что соответствует данным других авторов. Совместный анализ результатов лазерного зондирования вертикального распределения озона в диапазоне высот 6–14 км и аэрологического зондирования метеостанции г. Колпашево показал, что в марте 2023 г. над Томском, возможно, был зарегистрирован довольно редкий процесс стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс через тропопаузу. Дальнейший реанализ всей базы данных измерений вертикального распределения озона внесет свой вклад в понимание климатологии, химии атмосферы и циркуляционных механизмов,

происходящих в ней, при проникновении воздушных масс из стратосферы в тропосферу через тропопаузу.

Список литературы

1. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Режимы крупномасштабной циркуляции атмосферы над Азией в периоды формирования экстремально высокой приземной концентрации озона в районе г. Томска (Западная Сибирь) // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 1. С. 59–65. DOI: 10.15372/AOO20230108; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. The large-scale atmospheric circulation pattern over Asia associated with formation of extremely high surface ozone concentrations in the Region of Tomsk (Western Siberia) // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 4. P. 348–355.
2. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Отмахов В.И., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Изменение состава воздуха при переходе из тропосферы в стратосферу // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 11. С. 874–881. DOI: 10.15372/AOO20211107; Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Golobokova L.P., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov A.S., Otmakhov V.I., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V. Change in the air composition upon the transition from the troposphere to the stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 6. P. 567–576.
3. Андреев В.В., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Горюшкин В.А., Давыдов Д.К., Демин В.И., Дудорова Н.В., Еланский Н.Ф., Иванов Р.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Коновальцева Л.В., Коренский М.Ю., Котельников С.Н., Кузнецова И.Н., Лапченко В.А., Лезина Е.А., Марченко О.О., Оболкин В.А., Постыля-

- ков О.В., Потемкин В.Л., Савкин Д.Е., Семутникова Е.Г., Сеник И.А., Степанов Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Ходжер Т.В., Челибанов И.В., Челибанов В.П., Широтов В.В., Штабкин Ю.А., Шукуров К.А. Концентрация тропосферного озона на территории России в 2023 г. // *Оптика атмосф. и океана*. 2024. Т. 37, № 8. С. 688–698. DOI: 10.15372/AOO20240809.
4. Ancellet G., Godin-Beekmann S., Smit H.G.J., Stauffer R.M., Van Malderen R., Bodichon R., Pazmico A. Homogenization of the Observatoire de Haute Provence electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde data record: Comparison with lidar and satellite observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15. P. 3105–3120. DOI: 10.5194/amt-15-3105-2022.
 5. Trickl T., Giehl H., Neidl F., Perfahl M., Vogelmann H. Three decades of tropospheric ozone lidar development at Garmisch-Partenkirchen, Germany // *Atmos. Meas. Tech.* 2020. V. 13. P. 6357–6390. DOI: 10.5194/amt-13-6357-2020.
 6. Wing R., Godin-Beekmann S., Steinbrecht W., McGee T.J., Sullivan J.T., Khaykin S., Summicht G., Twigg L. Evaluation of the new DWD ozone and temperature lidar during the Hohenpeißenberg Ozone Profiling Study (HOPS) and comparison of results with previous NDACC campaigns // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14. P. 3773–3794. DOI: 10.5194/amt-14-3773-2021.
 7. Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos C., Papayannis A., Wemli H., Gerasopoulos E. Observations of stratosphere–troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N D12. P. STA12/1–STA12/10.
 8. Nakazato M., Nagai T., Sakai T., Hirose Y. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide // *Appl. Opt.* 2007. V. 46, N 12. P. 2269–2279. DOI: 10.1364/ao.46.002269.
 9. Букреев В.С., Варпанетов С.К., Веселовский И.А., Галустов А.С., Ковалев Ю.М., Прохоров А.М., Светогоров Е.С., Хмелевцов С.С., Ли Ч.Х. Лидарная система для зондирования стратосферного и тропосферного озона на основе эксимерных лазеров // *Квант. электрон.* 1994. Т. 21, № 6. С. 591–596.
 10. 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.
 11. Measures R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
 12. Иванова А.П. Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 3. С. 22–45.
 13. Shakina N.P., Ivanova A.R., Elansky N.F., Markova T.A. Transcontinental observations of surface ozone concentration in the TROICA experiments: 2. The effect of the stratosphere – troposphere exchange // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2001. V. 37, N 1. P. S39–S48.
 14. Brioude J., Cammas J.-P., Cooper O.R., Nedelec P. Characterization of the composition, structure, and seasonal variation of the mixing layer above the extratropical tropopause as revealed by MOZAIC measurements // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D00B01. P. 1–17. DOI: 10.1029/2007JD009184.
 15. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосф. и океана*. 2004. Т. 17, № 10. С. 857–864.
 16. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Лидар дифференциального поглощения для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 10. С. 880–883.
 17. 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.
 18. Зуев В.В., Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Ельников А.В. Наблюдение прорыва воздушных масс в верхнюю тропосферу по лидарным измерениям озона // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 7. С. 593–599.
 19. Stohl A., Bonasoni P., Cristofanelli P., Collins W. Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STOCATO // *J. Geophys. Res.* D. 2003. V. 108, N 12. P. STA1/1–STA1/15. DOI: 10.1029/2002JD002490.

S.I. Dolgii, A.P. Makeev, A.V. Nevzorov, A.A. Nevzorov, N.S. Salnikova, O.V. Kharchenko. Vertical distribution of ozone in the upper troposphere – stratosphere according to lidar sounding data at the Siberian lidar station in 2023.

The paper presents the results of lidar measurements of the vertical ozone distribution in the lower stratosphere – upper troposphere at the Siberian Lidar Station (SLS) of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, over Tomsk in 2023. The annual variation in the vertical ozone distribution and the increased ozone content in the lower stratosphere – upper troposphere recorded in March 2023 are shown. It is assumed that the event of high ozone content in the lower stratosphere – upper troposphere on March 9 was caused by a rather rare process of stratospheric – tropospheric transfer of an air mass through the tropopause.