
ENVIRONMENTAL SCIENCE

DOI: <https://doi.org/10.23649/jae.2022.28.8.003>

Romanovskii O.A.¹, Nevzorov A.A.^{2,*}, Nevzorov A.V.³, Kharchenko O.V.⁴

^{1,2,3,4} V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russia

* Corresponding author (naa[at]iao.ru)

Received: 01.11.2022; Accepted: 24.11.2022; Published: 19.12.2022

LIDAR MEASUREMENTS OF THE OZONOSPHERE IN THE ALTITUDE RANGE OF 5-45 KM

Research article

Abstract

As it is known, atmospheric ozone is the strongest oxidizer and a natural protective umbrella against harmful ultraviolet solar radiation. Approximately 80% of ozone is concentrated in the stratosphere. Depletion of the ozone layer leads to drought and the death of agricultural crops. The sudden transfer of air masses from the stratosphere to the troposphere can lead to the failure of engines of agricultural aviation and ground equipment, and also affects the health of livestock farms. Therefore, monitoring the state of the ozonosphere is an important task of the food security of Russia. For this purpose, methods and means of lidar control of the ozonosphere are the most informative. At the Siberian Lidar Station, based on the method of differential absorption and dispersion, a laser measuring complex has been developed, operating at the sounding wavelengths of 299/341 nm and 308/353 nm, which covers the high-altitude range of sounding vertical ozone profiles from ~5 km to ~45 km. To control the ozonosphere by lidar methods, it is important to take into account the actual ozone absorption cross-sections. Regular measurements were carried out and the results of the influence of the absorption cross-section on the behaviour of the ozone profile were presented.

Keywords: atmosphere, lidar complex, ozone profile.

Романовский О.А.¹, Невзоров А.А.^{2,*}, Невзоров А.В.³, Харченко О.В.⁴

^{1,2,3,4} Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

* Корреспондирующий автор (naa[at]iao.ru)

Получена: 01.11.2022; Доработана: 24.11.2022; Опубликована: 19.12.2022

ЛИДАРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОЗОНОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ ВЫСОТ 5-45 КМ

Научная статья

Аннотация

Как известно, атмосферный озон является сильнейшим окислителем и естественным защитным зонтиком от пагубного ультрафиолетового солнечного излучения. Примерно 80% озона сосредоточено в стратосфере. Истощение озонового слоя приводит к засухе и гибели агрокультур. Внезапный перенос воздушных масс из стратосферы в тропосферу может привести к выходам из строя двигателей аграрной авиации и наземной техники, а также влияет на здоровье поголовья животноводческих ферм. Поэтому отслеживание состояния озоносферы является важной задачей продовольственной безопасности России. Для этой цели наиболее информативными являются методы и средства лидарного контроля озоносферы. На Сибирской лидарной станции на основе метода дифференциального поглощения и рассеяния разработан и действует лазерный измерительный комплекс на длинах волн зондирования 299/341 нм и 308/353 нм, который охватывает высотный диапазон зондирования вертикальных профилей озона от ~5 км до ~45 км. Для контроля озоносферы лидарными методами важно учитывать актуальные сечения поглощения озона. Проведены регулярные измерения и представлены результаты влияния сечения поглощения на поведение озонового профиля.

Ключевые слова: атмосфера, лидарный комплекс, озоновый профиль.

1. Введение

Малые газовые составляющие (МГС) атмосферы, в том числе водяной пар, углекислый газ, озон, оксиды азота и серы, окись углерода и многие другие, являются оптически активными компонентами атмосферы, сильно влияющими на следующие процессы: погодообразование, загрязнение воздушного бассейна промышленными выбросами, преобразование солнечной радиации и распространение оптических волн. Для их контроля возникает проблема

развития приборов и методов анализа газового состава атмосферы, причем наиболее активное развитие демонстрируют дистанционные методы [1, С. 7–95], которые, в отличие от стандартных контактных методов газового анализа, обеспечивают возможность получения данных с высокой скоростью в огромных пространственных масштабах. Эта проблема решается путем организации сетей лидарных станций и мобильных лидаров, которые в совокупности контролируют изменения озоносферы и газовых составляющих озонового цикла [2, С. 3603–3612]. Заблаговременное предупреждение о появлении неблагоприятных атмосферных факторах, в том числе техногенные катастрофы, для принятия соответствующих мер большими агрокомплексами возможно только при участии сети лидарных станций и мобильных лидаров. Представлена часть действующих лидарных станций и мобильных лидаров, которые исследуют стратосферу и тропосферу: Table Mountain Facility (TMF) (34,4° с.ш., 117,7° з.д.), США [3, С. 1395–1427], [4, С. 7550–7555]; Observatoire de Haute Provence (ОНП) (43,94° с.ш., 5,71° в.д.), Франция [5, С. 251–263], [6, С. 78–89]; Goddard Space Flight Center (GSFC) (37,1° с.ш., 76,39° з.д.), США [7, С. 3529–3548]; Siberian Lidar Station (SLS) (56,50° с.ш., 85,00° в.д.), Россия [8, С. 196], [9, С. 447]; Yangbajing Observatory (30°5′ с.ш., 90°33′ в.д.), Китай [10, С. 4126–4139]; Mauna Loa Observatory (MLO) (19,53° с.ш., 155,57° з.д.), США [11, С. 1301–1318].

Целью данной работы является изучение влияния различных наборов сечений поглощения на восстановленный профиль озона и проведение регулярных измерений в диапазоне высот ~5–45 км с использованием лидара дифференциального поглощения.

2. Лидарный комплекс

Лидарный комплекс работает в режиме регулярных измерений в ночное время суток в условиях безоблачного неба на длинах волн зондирования 299/341 и 308/353 нм для изучения вертикального распределения концентрации озона (ВРО) в верхней тропосфере-стратосфере, в особенности в районе тропопаузы, для отслеживания сезонной изменчивости и процессов стратосферно-тропосферного переноса воздушных масс. Лидарное зондирование позволяет охватить диапазон высот от ~5 до ~20 км и от ~15 до ~45 км [8, С. 196], [9, С. 447]. На рисунке 1 представлена блок-схема измерительного комплекса Сибирской лидарной станции.

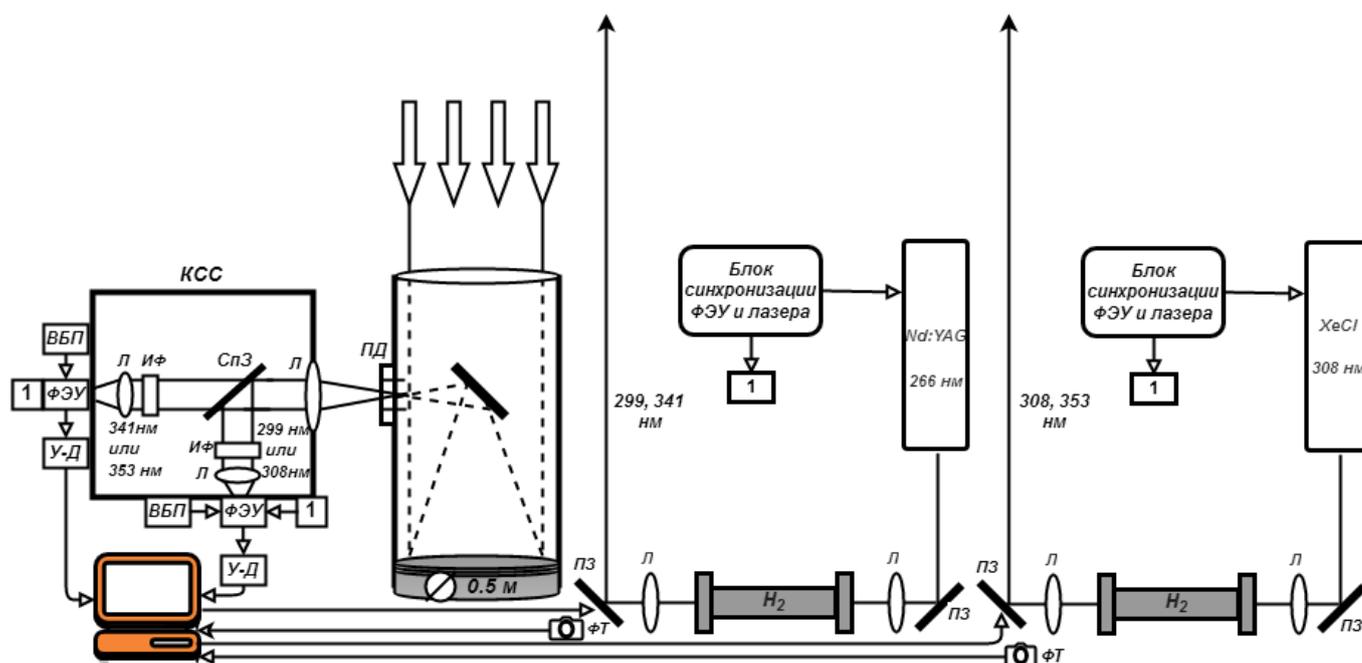


Рис. 1 – Блок-схема лидарного комплекса

Примечание: 1 – сигнал управления блоками ФЭУ; Nd:YAG и XeCl – лазерный источник; Л – линзы, H₂ – ячейка ВКР-преобразования с водородом; ПЗ – поворотные зеркала, 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

В таблице 1 представлены основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов лидарного комплекса.

Таблица 1 – Основные технические характеристики лидарного комплекса

Передачик	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
Приемник	Ньютоновский телескоп	
Диаметр зеркала, м	0,5	
Фокусное расстояние, м	1,5	

Регулярные измерения вертикальных профилей озона на Сибирской лидарной станции в диапазоне высот ~5–45 км проводятся с 2017 г. [9, С. 447].

3. Лидарный метод контроля озоносферы

Для работы лидарного комплекса в режиме постоянного мониторинга используется алгоритм обработки данных лидарного газоанализа методом дифференциального поглощения и рассеяния (МДП). Исходные уравнения для расчета концентрации озона на основе МДП при лидарном зондировании атмосферы имеют вид [12, С. 276–279]

$$\begin{aligned} N_{\text{on}}(H) &= c \cdot [\beta_{\text{on}}^a(H) + \beta_{\text{on}}^m(H)] \cdot \exp \left[-2 \int_0^H \alpha_{\text{on}}^a(H) + \alpha_{\text{on}}^m + k_{\text{on}} \cdot n(H) \right], \\ N_{\text{off}}(H) &= c \cdot [\beta_{\text{off}}^a(H) + \beta_{\text{off}}^m(H)] \cdot \exp \left[-2 \int_0^H \alpha_{\text{off}}^a(H) + \alpha_{\text{off}}^m + k_{\text{off}} \cdot n(H) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где $N_{\text{on}}(H)$ и $N_{\text{off}}(H)$ — отраженный сигнал, зарегистрированный на соответствующих длинах волн (on — длина волны лазерного излучения в центре линии поглощения газа, off — длина волны лазерного излучения вне центра линии поглощения газа), c — длина волны инструментальная постоянная, $\alpha_{\text{off}}^a(H)$ и $\alpha_{\text{on}}^a(H)$ — коэффициенты ослабления аэрозоля, $\beta_{\text{on}}^a(H)$ и $\beta_{\text{off}}^a(H)$ — коэффициенты обратного рассеяния аэрозоля, k_{on} и k_{off} — сечение поглощения озона, α_{on}^m и α_{off}^m — коэффициенты ослабления из-за молекулярного рассеяния, $\beta_m(H)$ — коэффициент обратного молекулярного рассеяния и $n(H)$ — концентрация озона.

С точки зрения восстановления профиля концентрации озона, отношение двух лидарных сигналов (1) может быть математически преобразовано для получения концентрации газа, распределенного по исследуемой трассе зондирования, которая рассчитывается по следующей формуле [12, С. 276–279]:

$$n(H) = \frac{1}{2\Delta k(H, T)} \cdot \left\{ \frac{d}{dH} \ln \left[\frac{N_{\text{off}}(H)}{N_{\text{on}}(H)} \right] \right\} \quad (2)$$

где T — температура на высоте H , $\Delta k(H, T)$ — разность между $k_{\text{on}}(H, T)$ и $k_{\text{off}}(H, T)$.

Восстановление (2) включает актуальную зависимость сечения поглощения озона от температуры. В нашем исследовании использовались сечения поглощения (см²/молекула) из работ Горшелева и Сердюченко [13, С. 609–624], [14, С. 625–636], данные спектрометра SCIAMACHY [15], данные GOME [16] для длин волн 299 и 341 нм, 308 и 353 нм, представленные на рисунке 2. Для восстановления профилей озона используются метеопараметры спутника MetOp [17, С. 1358–1361] со станции приема спутниковых данных [18, С. 4510].

Данные из работы Горшелева и Сердюченко на сегодняшний день являются одними из лучших наборов сечения поглощения. Эти данные являются наиболее актуальными измерениями сечения поглощения, в которых были учтены все предыдущие результаты. Они использовали два типа спектрометров (Эшелле и Фурье-преобразование), что позволило получить новые широкополосные сечения поглощения озона, охватывающие диапазон длин волн от УФ до ИК (213–1100 нм). В своей работе они добились измерения сечения поглощения при рекордно низкой температуре 193 К и осуществили шаг в температурных значениях 10 К для измерения сечения поглощения по сравнению с шагом 20 К в GOME и SCIAMACHY. В результате число дискретных температурно-зависимых сечений поглощения по данным Горшелева и Сердюченко примерно в два раза больше, чем можно получить с помощью значений GOME и SCIAMACHY. Для решения обратной задачи восстановления концентрации озона по данным лидарного зондирования мы предпочли выбрать результаты Горшелева и Сердюченко, так как погрешность всех наборов сечения поглощения не превышает ~3%.

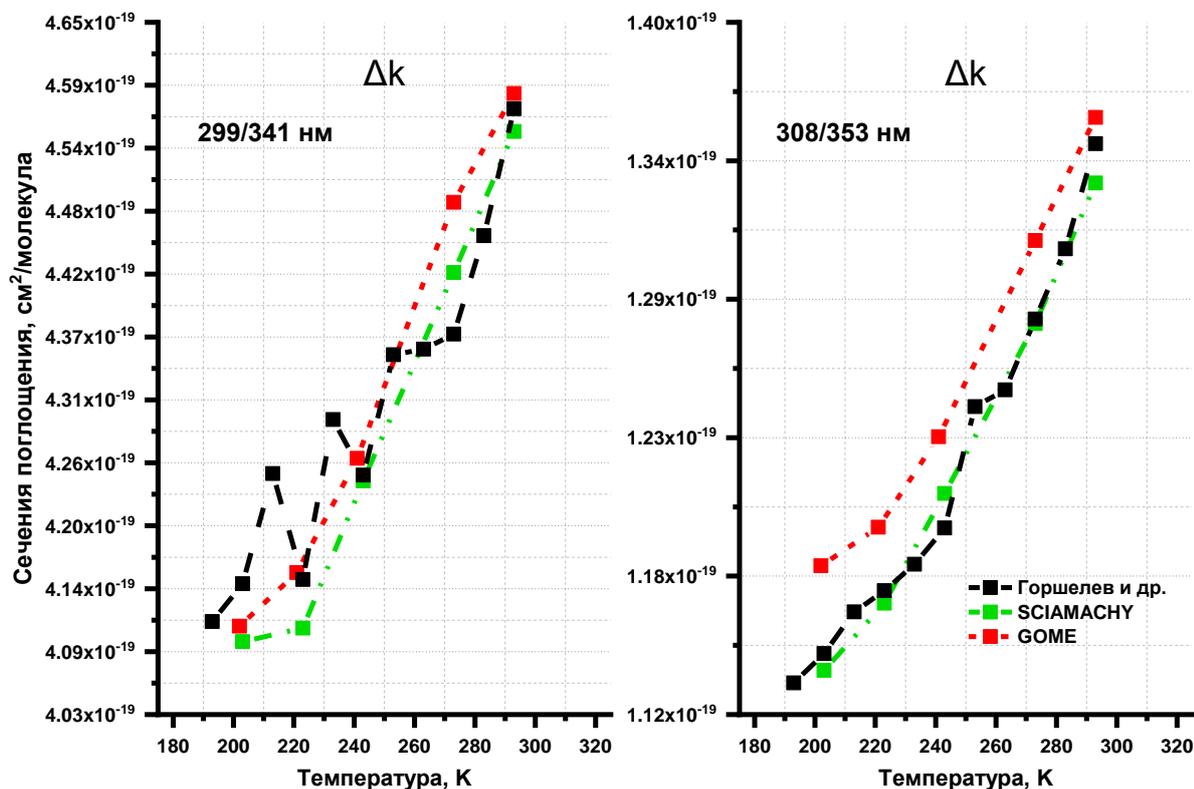


Рис. 2 – Зависимость сечения поглощения озона от температуры

4. Результаты и обсуждение

Приведенные в предыдущем разделе зависимости сечения поглощения от температуры были нами использованы для решения обратной задачи восстановления концентрации озона по данным лидарного зондирования.

На рисунке 3 представлены примеры частных случаев применения разных наборов сечения поглощения по измерениям, полученным в 2022 г., и представленным в увеличенном масштабе, чтобы были заметны отличия.

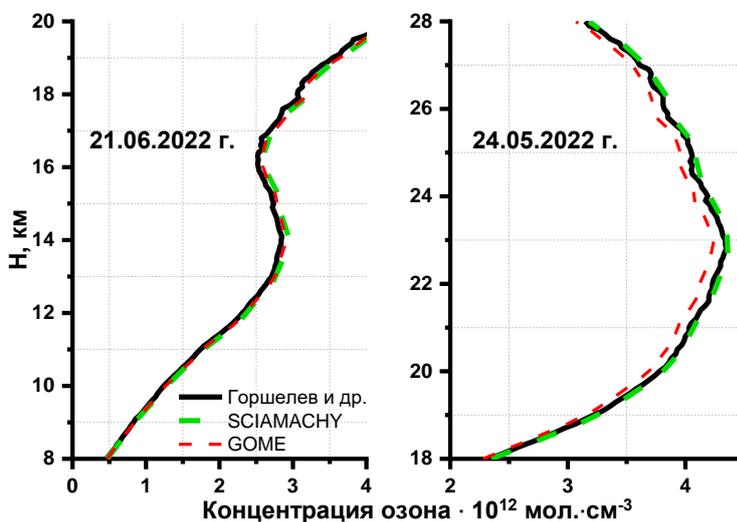


Рис. 3 – Восстановленные профили с использованием разных наборов сечения поглощения, полученные в 2022 г.

Из рисунка 3 видно, что применение разных наборов сечения поглощения существенно влияют на поведение профиля озона на озоновом максимуме в стратосфере, который находится на высоте около 22 км в Томске, где проводились измерения. Восстановленный профиль с использованием данных GOME имеет наименьшие значения на высоте 22 км и меньше профиля Горшелева на $0,11 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³. Различия между профилями SCIAMACHY и GOME достигают на высоте озонового максимума $0,14 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³. Для восстановления тропосферных профилей с использованием разных наборов сечения поглощения характерно нарастание разницы с высотой. Так, например, на высоте 14 км значения концентрации озона профиля Горшелев $2,84 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³, GOME $2,9 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³, SCIAMACHY $2,93 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³, а на высоте 8 км Горшелев $0,47 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³, GOME и SCIAMACHY профили имеют равные значения, которые соответствуют $0,48 \cdot 10^{12}$ мол.·см⁻³. Таким образом можно сделать вывод, что в зависимости от того какой набор сечения поглощения используется в восстановлении профилей озона как в представленном примере так при долгосрочном мониторинге его влияние на конечный результат – значимо. Поэтому использование выбранного набора сечения поглощения должно быть обосновано. Температурная зависимость сечений

поглощения будет сильнее влиять на поведение профилей озона в тропосфере и стратосфере после добавления ранее неисследованных температурных величин, что существенно повысит надежность восстановления концентрации озона. Из трех наборов сечений поглощения мы рекомендуем использовать данные Горшелева и Средюченко [13, С. 609–624], [14, С. 625–636], поскольку они дают более подробную информацию о сечениях поглощения по дискретным значениям температуры, что очень важно для лидарного зондирования тропосферы, где влияние температурной изменчивости велико. В стратосфере данные SCIAMACHY дают несколько более завышенные оценки концентраций озона, чем Горшелев. Однако, учитывая, что при возникновении озоновых аномалий важно учитывать более выраженные вариации температуры, данные Горшелева следует рассматривать как окончательный выбор сечений поглощения для восстановления на стратосферных и тропосферных высотах.

Funding

The work was supported by the grant No. 075-15-2020-787 in the form of a subsidy for a Major scientific project from Ministry of Science and Higher Education of Russia “Fundamentals, methods and technologies for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory”.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта № 075-15-2020-787 в виде субсидии на Крупный научный проект Минобрнауки России «Основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды на Байкальской природной территории».

Conflict of Interest

None declared.

Конфликт интересов

Не указан.

References

1. Agishev R. Laser Remote Sensing of the Environment: Methods and means / R. Agishev. – M. : PhysMathLit Publ. House, 2019. – 264 p.
2. Hassler B. Past changes in the vertical distribution of ozone – Part 1: Measurement techniques, uncertainties and availability / B. Hassler, I. Petropavlovskikh, J. Staehelin et. al // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – V. 7. – P. 1395–1427. – DOI: 10.5194/amt-7-1395-2014
3. McDermid I.S. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone / I.S. McDermid, S.M. Godin, L.O. Lindquist // Appl. Opt. – 1990. – V. 29. – P. 3603–3612. – DOI: 10.1364/AO.29.003603
4. McDermid I.S., Redesign and improved performance of the tropospheric ozone lidar at the Jet Propulsion Laboratory Table Mountain Facility / I.S. McDermid, G. Beyerle, D.A. Haner et al. // Appl. Opt. – 2002. – V. 41. – P. 7550–7555. – DOI: 10.1364/ao.41.007550
5. Godin-Beekmanna S. Long-term DIAL monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution / S. Godin-Beekmanna, T. Songa, B. Heeseb // Proceeding of SPIE. – 2003. – V. 4893. – P. 251–263. – DOI: 10.1117/12.466698
6. Gaudel A. 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 / A. Gaudel, G. Ancellet, S. Godin-Beekmann // Atmospheric Environment. – 2015. – V. 113. – P. 78–89. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.04.028
7. Sullivan J.T. A mobile differential absorption lidar to measure sub-hourly fluctuation of tropospheric ozone profiles in the Baltimore–Washington, D.C. region / J.T. Sullivan, T.J. McGee, G.K. Sumnicht et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – V. 7. – pp. 3529–3548. DOI: 10.5194/amt-7-3529-2014
8. Dolgii S.I. Measurements of Ozone Vertical Profiles in the Upper Troposphere–Stratosphere over Western Siberia by DIAL, MLS, and IASI / S.I. Dolgii, A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov et al. // Atmosphere. – 2020. – V. 11. – P. 196. – DOI: 10.3390/atmos11020196
9. Dolgii S.I. Intercomparison of ozone vertical profile measurements by differential absorption lidar and IASI/MetOp satellite in the upper troposphere–lower stratosphere / S.I. Dolgii, A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov // Remote Sensing. – 2017. – V. 9. – P. 447. – DOI: 10.3390/rs9050447
10. Fang X. A mobile differential absorption lidar for simultaneous observations of tropospheric and stratospheric ozone over Tibet / X. Fang, T. Li, C. Ban et. al // Opt. Express. – 2019. – V. 27. – P. 4126–4139. – DOI: 10.1364/OE.27.004126
11. Nair P.J. Relative drifts and stability of satellite and ground-based stratospheric ozone profiles at NDACC lidar stations / P.J. Nair, S. Godin-Beekmann, L. Froidevaux et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2012. – V. 5. – P. 1301–1318. – DOI: 10.5194/amt-5-1301-2012
12. Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications / R. M. Measures. – Malabar, FL: Krieger Publishing Company, 1992. – 510 p.
13. Gorshelev V. High spectral resolution ozone absorption cross-sections — Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K / V. Gorshelev, A. Serdyuchenko, M. Weber et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – V. 7. – P. 609–624. – DOI: 10.5194/amt-7-609-2014
14. Serdyuchenko A. High spectral resolution ozone absorption cross-sections — Part 2: Temperature dependence / A. Serdyuchenko, V. Gorshelev, M. Weber et. al // Atmos. Meas. Tech. – 2014. – V. 7. – P. 625–636. – DOI: 10.5194/amt-7-625-2014

15. Molecular Spectroscopy and Chemical Kinetics Group studies at the IUP, University of Bremen. Temperature dependent absorption cross sections measured with the SCIAMACHY satellite spectrometer – URL: <https://www.iup.uni-bremen.de/gruppen/molspec/databases/sciamachydata/index.html> (accessed 09.09.2022).

16. Molecular Spectroscopy and Chemical Kinetics Group studies at the IUP, University of Bremen. Temperature-dependent absorption cross-sections of O₃ in the 231-794 nm range recorded with GOME FM – URL: <https://www.iup.uni-bremen.de/gruppen/molspec/databases/gomefmdata/index.html> (accessed 09.09.2022).

17. August T. IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit / T. August, D. Klaes, P. Schlüssel et al. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2012. – V. 113. – P. 1340–1371. – DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.02.028.

18. Matvienko G.G. Complex experiment on studying the microphysical, chemical, and optical properties of aerosol particles and estimating the contribution of atmospheric aerosol-to-earth radiation budget / G.G. Matvienko, B.D. Belan, M.V. Panchenko et al. // *Atmos. Meas. Tech.* – 2015. – V. 8. – P. 4507–4520. – DOI: 10.5194/amt-8-4507-2015.