

## Сопоставление профилей озона по данным спутника MetOp и мобильного лидара

А.А. Невзоров<sup>✉</sup>, 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 01.05.2024;  
принята к печати 07.05.2024

Малые газовые составляющие (МГС) являются оптически активными элементами атмосферы. МГС оказывают большое влияние на протекание атмосферных процессов (трансформацию солнечного излучения, погодообразование, загрязнение воздушного бассейна промышленными выбросами, распространение оптических волн). Озон занимает особое место в ряде газов МГС. Озоновый слой играет роль естественной защиты планеты от коротковолнового солнечного излучения. Поэтому контроль озоносферы наземными и спутниковыми средствами измерений позволяет получить наиболее достоверную картину состояния атмосферы и в особенности озонового слоя. Решение этой актуальной задачи возможно только при постоянном улучшении аппаратной базы и совершенствовании методологических подходов научного исследования атмосферы. В настоящей работе проведен ряд измерений мобильным озоновым лидаром на длинах волн зондирования 299/341 нм в высотном диапазоне 0,1–12 км на Сибирской лидарной станции (СЛС). Выполнено сопоставление восстановленных вертикальных профилей озона по данным лидара и метеорологического спутника MetOp Европейского космического агентства, полученным в 2023 г. Показано, что средняя относительная разность между профилями изменяется от –65,6 до 15,3% на высотах от 0,1 до 12 км. Результаты сопоставления подтверждают хорошие перспективы использования длин волн зондирования озона в ранее неохваченном на СЛС высотном диапазоне 0,1–5 км. Представленные результаты будут задействованы в формировании модели вертикального распределения концентрации озона, в оценке экологического состояния атмосферы на территории Томской области.

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

### Введение

Контроль изменения климата Земли возможен только лишь с помощью регулярного мониторинга атмосферных параметров [1]. Одним из важнейших отслеживаемых параметров атмосферы является озон, который регенерирует из молекулярного кислорода посредством присоединения к его молекуле атомарного кислорода под воздействием ультрафиолетового излучения Солнца. Примерно 85% озоносферы расположено на высотах стратосферы от 15 до 45 км. Стратосферный озон защищает биосферу Земли от пагубного ультрафиолетового излучения Солнца. Процесс образования и разрушения стратосферного озона может легко нарушиться из-за воздействия антропогенных факторов и мощных

вулканических извержений. Поэтому необходим постоянный мониторинг наземными и спутниковыми приборами для предотвращения и предупреждения деградации озона. Озон является сильнейшим окислителем. Высокие концентрации озона в воздухе влияют на жизнь и здоровье людей, а также воздействуют на двигатели наземного и воздушного транспорта. Поэтому особо важен контроль вертикального распределения озона (ВРО) от 0,1 до 12 км.

Лидарные исследования ВРО являются практически единственным недорогим и точным способом получения информации о состоянии озоносферы [2]. К значительным преимуществам лазерного зондирования следует отнести высокое пространственно-временное разрешение получаемых лидарных данных. В Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН) на Сибирской лидарной станции (СЛС) созданы и успешно функционируют уникальные лидары, которые включены Постановлением Правительства РФ в «Перечень

\* 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).

уникальных экспериментальных установок национальной значимости» [3]. На СЛС регулярно проводятся измерения, позволяющие контролировать динамику ВРО над Томском в верхней тропосфере – стратосфере (~5–45 км).

На основании накопленного опыта обслуживания и модернизации измерительного комплекса СЛС в 2021 г. разработан и введен в эксплуатацию мобильный лидар с длинами волн зондирования 299 и 341 нм [4]. Результаты измерений этого лидара охватывают высоты от 0,1 до 12 км и дополняют исследования СЛС в высотном диапазоне ~0,1–5 км. Данные сетей лидарных станций озона, например Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) [5] и Tropospheric Ozone Lidar Network (TOLNet) [6], дополняют спутниковую информацию о ВРО. Для проведения интеркалибровочных работ в распоряжении исследователей есть данные о ВРО со спутников Aura, охватывающие высоты в диапазоне 8–56 км [7, 8], MetOp – 0,1–82 км [9], Suomi – 12–52 км [10], TIMED – 13–110 км [11]. Из приведенных данных ясно, что измерения тропосферного озона предоставляет только MetOp, который в дальнейшем мы и будем использовать. Наша статья является продолжением работы [12], в которой на базе данных 2015 г. сопоставлены профили MetOp и СЛС в высотном диапазоне 6–15 км. Аналогичные сравнения между MetOp и озонзондами были проведены в 2010 г. на ст. Мак-Мердо в Антарктиде [13].

Цель настоящей работы – сопоставление профилей вертикальной стратификации озона, восстановленных по данным мобильного лидара и спутника MetOp в высотном диапазоне от ~0,1 до 12 км.

## Материалы и методы

### Метод дифференциального поглощения и рассеяния

Лидарный метод дифференциального поглощения и рассеяния (МДП) предусматривает сравнение принятых эхосигналов из атмосферы, или лидарных сигналов, на двух длинах волн – 299 нм (поглощение озона), 341 нм (опорная длина волны). Анализ отношения двух лидарных сигналов на зондирующих длинах волн дает возможность оценить концентрацию озона в атмосфере и его пространственное распределение.

Для восстановления концентрации газа  $n(H)$  в атмосфере используется следующая формула [12, 14]:

$$n(H) = \frac{1}{2[k_{\text{on}}(H, T) - k_{\text{off}}(H, T)]} \times \left\{ \frac{d}{dH} \ln \left[ \frac{N_{\text{off}}(H)}{N_{\text{on}}(H)} \right] - \frac{d}{dH} \ln \left[ \frac{\beta_{\text{off}}^a(H) + \beta_{\text{off}}^m(H)}{\beta_{\text{on}}^a(H) + \beta_{\text{on}}^m(H)} \right] - 2 \cdot [\alpha_{\text{off}}^a(H) - \alpha_{\text{on}}^a(H)] - 2 \cdot [\alpha_{\text{off}}^m(H) - \alpha_{\text{on}}^m(H)] \right\}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{on}}(H, T)$  и  $k_{\text{off}}(H, T)$  – дифференциальное сечение поглощения, зависящее от температуры  $T$  и высоты  $H$  [15, 16] на длинах волн зондирования  $\lambda_{\text{on}}$  и  $\lambda_{\text{off}}$ ,  $\lambda_{\text{on}}$  – длина волны излучения лазера близ центра линии поглощения газа,  $\lambda_{\text{off}}$  – на крыле линии поглощения;  $N_{\text{on}}(H)$  и  $N_{\text{off}}(H)$  – зарегистрированные лидарные сигналы на длинах волн  $\lambda_{\text{on}}$  и  $\lambda_{\text{off}}$  на высоте  $H$  вдоль трассы зондирования;  $\alpha^m(H)$  – коэффициент ослабления молекулярного рассеяния;  $\alpha^a(H)$  – коэффициент ослабления аэрозольного рассеяния;  $\beta^a(H)$  – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния;  $\beta^m(H)$  – коэффициент обратного молекулярного рассеяния.

## Аппаратура

Мобильный лидар создан в ИОА СО РАН в лаборатории дистанционного зондирования окружающей среды. Он позволяет проводить измерения озона в высотном диапазоне от 0,1 до 12 км и исследовать особенности и отслеживать сезонную изменчивость озона, изучать влияние процессов стратосферно-тропосферного обмена на приземный слой. Прибор находится в режиме дежурных измерений для зондирования атмосферы на длинах волн 299 и 341 нм в ночное время суток в безоблачные дни [4]. На рис. 1 представлена его блок-схема.

Детальное описание устройства мобильного лидара приведено в работе [4], основные технические характеристики представлены ниже.

|                                                       |                            |
|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| Передатчик .....                                      | SOLAR QX 500               |
| Длина волны излучения лазера .....                    | 266 нм                     |
| Система охлаждения .....                              | воздушная                  |
| Энергия импульса (соотв. $\lambda$ ) .....            | до 25 мДж                  |
| Давление в ячейке ВКР с водородом .....               | 2 атм                      |
| Длины волн зондирования .....                         | 299/341 нм                 |
| Частота следования импульса (соотв. $\lambda$ ) ..... | 20/20 Гц                   |
| Длительность импульса .....                           | 10 нс                      |
| Зеркальный коллиматор .....                           | пятикратный ( $\times 5$ ) |
| Приемник .....                                        | телескоп Кассегрена        |
| Диаметр зеркала .....                                 | 0,35 м                     |
| Фокусное расстояние .....                             | 0,7 м                      |
| Счетчик фотонов .....                                 | RHCOUNT_4E                 |
| Пространственное разрешение .....                     | 1,5–150 м                  |
| Высотный диапазон .....                               | ~0,1–12 км                 |

Для сопоставления восстановленных профилей выбран инфракрасный интерферометр (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI), который работает на борту MetOp. Этот спутник находится на околокруговой солнечно-синхронной полярной орбите со средней высотой около 817 км и совершает около 14 витков в день. IASI измеряет в режиме, близком к реальному времени,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$  и  $\text{HNO}_3$ , а также профили температуры и влажности воздуха. Спутниковый прибор обеспечивает получение спектров высокого радиометрического качества с разрешением  $0,5 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне от 625 до  $2760 \text{ см}^{-1}$  [5]. Восстановление

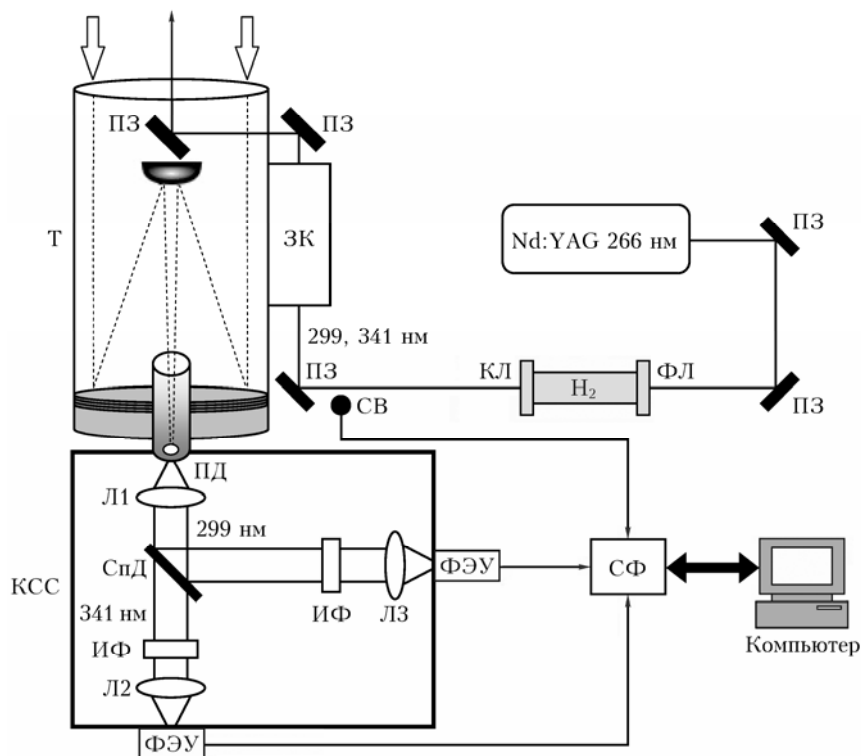


Рис. 1. Блок-схема мобильного озонного лидара: Nd:YAG — твердотельный лазер; ФЛ — фокусирующая линза; КЛ — коллимирующая линза; Н<sub>2</sub> — ячейка вынужденного комбинационного рассеяния с водородом, оборудованная линзами; ПЗ — поворотное зеркало; ЗК — зеркальный коллиматор; Т — приемный телескоп, собранный по схеме Кассегрена с главным зеркалом диаметром 0,35 м; КСС — кювета спектральной селекции, оборудованная линзами; ПД — поляризатор; Л — линза; СпД — спектроделительное зеркало; ИФ — интерференционные фильтры; ФЭУ — модуль фотоэлектронного умножителя H12386-210 HAMAMATSU; СФ — счетчик фотонов PHCOUNT\_4E; СВ — световод для запуска счетчика фотонов; Компьютер — персональный компьютер для сбора и хранения получаемой информации

профилей озона по данным спутникового зондирования выполняется в диапазоне 1025–1075 см<sup>-1</sup>. Данные IASI получены с помощью станции приема спутниковой информации 2,4 LB фирмы Orbital Systems (США), введенной в эксплуатацию в ИОА СО РАН в 2011 г. [17]. Получаемая информация позволяет сравнивать спутниковые данные с результатами лидарного зондирования мобильного лидара, а также использовать метеоданные для включения реальной температуры в восстановление ВРО по МДП.

## Результаты и обсуждение

Лидарные измерения озона проводятся в вечернее и ночное время в условиях безоблачного неба. Лидарные сигналы регистрировались с пространственным разрешением 50 м и временем записи одного файла 5–10 мин. Погрешность восстановления возрастала в диапазоне высот ~0,1–12 км с 8 до 22%. Погрешность восстановленных профилей MetOp достигает 30% на высотах верхней стратосферы. Мобильный лидар на время проведения натурных экспериментов лазерного зондирования атмосферы базировался на СЛС. Отбор данных MetOp производится по времени регистрации между двумя крайними наборами измерений. Первые измерения получают примерно в 07:00–08:00 по

Гринвичу (GMT), а вторые в 15:00–21:00 GMT, учитывая, что в зимний период лидарные измерения проводятся, как правило, в 17:00–19:00 GMT. Иногда спутниковые измерения в 06:00–08:00 или в 15:00–21:00 GMT просто отсутствуют. Поэтому подбираются ближайшие измерения из имеющихся наборов данных. В таблице представлено пространственно-временное сопоставление лидарных и спутниковых данных.

Пространственно-временное сопоставление лидарных и спутниковых данных

| Дата          | СЛС<br>(56,5° с.ш.;<br>85,0° в.д.) | Спутник MetOp<br>(56,47° с.ш.;<br>85,04° в.д. ) |
|---------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|
|               | GMT                                | GMT                                             |
| 21.01.2023 г. | 13:03–13:43                        | 14:44                                           |
| 15.03.2023 г. | 17:37–18:19                        | 05:02                                           |
| 17.03.2023 г. | 16:39–17:19                        | 15:50                                           |
| 11.04.2023 г. | 18:35–19:15                        | 14:35                                           |
| 23.04.2023 г. | 17:26–18:16                        | 15:17                                           |

Следует отметить, что лидар работает в режиме счета фотонов и накопление данных происходит с пространственным разрешением лидарных сигналов 50 м, в то время как пространственный шаг данных MetOp, как правило, постепенно увеличивается с высотой (от 160 м около приземного слоя

до  $2 \pm 0,5$  км в стратосфере). Это обусловлено алгоритмом восстановления озоновых профилей для спутникового прибора [18]. В отличие от лидарных профилей данные IASI менее детальные и не описывают подробно ВРО. Для сравнения к спутниковым и лидарным ВРО была добавлена модель Крюгера [19] (рис. 2).

На рис. 2 сопоставлены профили ВРО, измеренные на СЛС мобильным лидаром и MetOp. Для удобства все профили приведены к общему высотному диапазону 0,1–12 км. Из рис. 2 видно, что для всего периода наблюдений прослеживается завышение концентраций озона MetOp по сравнению с профилями мобильного лидара в диапазоне от 0,1 до ~8,5 км.

Рис. 3 иллюстрирует результаты анализа, проведенного по спутниковым и лидарным измерениям озона на рис. 2. На рис. 3, а сопоставлены средние за исследуемый период профили ВРО. Видно, что с высотой возрастает согласование между профилями до тропопаузы (до 9,3 км). Это же прослеживается на рис. 3, б: средняя разность (лидар – IASI, обозначено черным пунктиром «средний») отрицательна в диапазоне высот до 9,3 км. Также стоит отметить, что средний профиль лидара ближе к данным спутника, чем к модели Крюгера. Из рис. 3, а видно, что средние профили в высотном диапазоне 9–12 км очень хорошо согласуются. Однако в отдельных случаях, как показано на рис. 2 и в особенности на рис. 3, б, в, который сформирован по всем дням измерений, присутствуют значительные расхождения в абсолютных и относительных единицах. Это подтверждается большим коридором среднеквадратического отклонения.

Поскольку озон имеет заметный годовой ход, то для того чтобы найти относительные погрешности его измерения прибором IASI, разность концентраций нормировали на значения, полученные лидаром, а именно вычислили  $100 \times (\text{лидар} - \text{IASI}) /$

лидар с использованием восстановленных профилей (рис. 3, в).

На рис. 3, б, в «минимум» обозначает профиль разности (лидар – IASI) в абсолютных единицах и профиль разности  $(100 \times (\text{лидар} - \text{IASI}) / \text{лидар})$  в процентах, соответственно, который сформировался в результате отбора из разности профилей лидара и спутника по дням измерений с самыми минимальными величинами. Аналогично получили максимальный профиль (обозначен как «максимум»).

Средняя относительная разность на рис. 3, в отрицательна в диапазоне высот от 0,1 до 12 км, где она достигает минимального значения (–65,6%) на высоте 0,2 км и максимального (15,3%) на 12 км. Минимальная относительная разность (по профилю «минимум») изменяется от –145,6% на 10,9 км до –22,1% на 12 км. Максимальная (по профилю «максимум») относительная разность в этих высотах составляет –64,5% на высоте 0,2 км и 47,4% на 11 км.

Отдельно отметим показатели в интервале высот 0,1–5 км, где средняя относительная разность изменяется от –65,6 до –34,3%, минимальная возрастает от –116% на 3,7 км до –44,1% на 4,9 км, максимальная варьируется от –64,4% на 0,2 км до –6,3% на 3,5 км.

Таким образом, проведенное сопоставление показывает, что усредненные абсолютные различия концентрации озона, измеренные лидаром и IASI, могут изменяться от  $-0,22 \cdot 10^{12}$  до  $0,45 \cdot 10^{12}$  молек. · см<sup>–3</sup>, поэтому средняя относительная разность находится в диапазоне –65,6...15,3%.

Из анализа следует, что присутствует статистическое завышение концентрации озона от приземного слоя до тропопаузы спутником MetOp по сравнению с лидаром, что, вероятно, связано с использованием некорректной априорной модели в алгоритме восстановления ВРО по спутниковым данным над Томском [18].

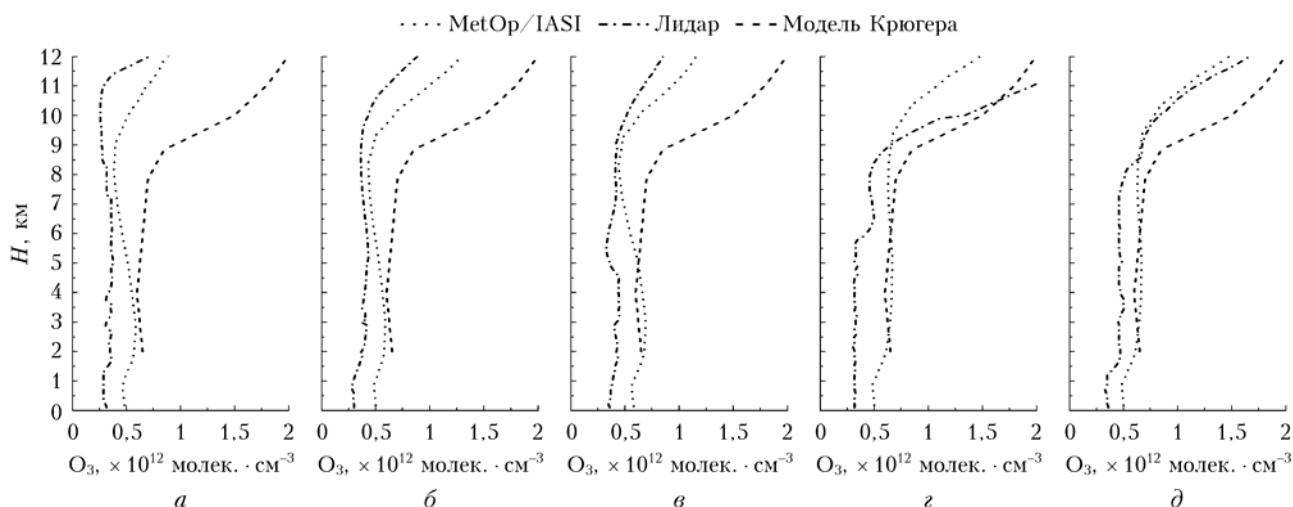


Рис. 2. Сопоставление вертикальных профилей озона мобильного лидара и спутника MetOp в январе–апреле 2023 г. над г. Томском: а – 13:03–13:43 (21.01.2023 г.); б – 17:37–18:19 (15.03.2023 г.); в – 16:39–17:19 (17.03.2023 г.); г – 18:35–19:15 (11.04.2023 г.); д – 17:26–18:16 (23.04.2023 г.)

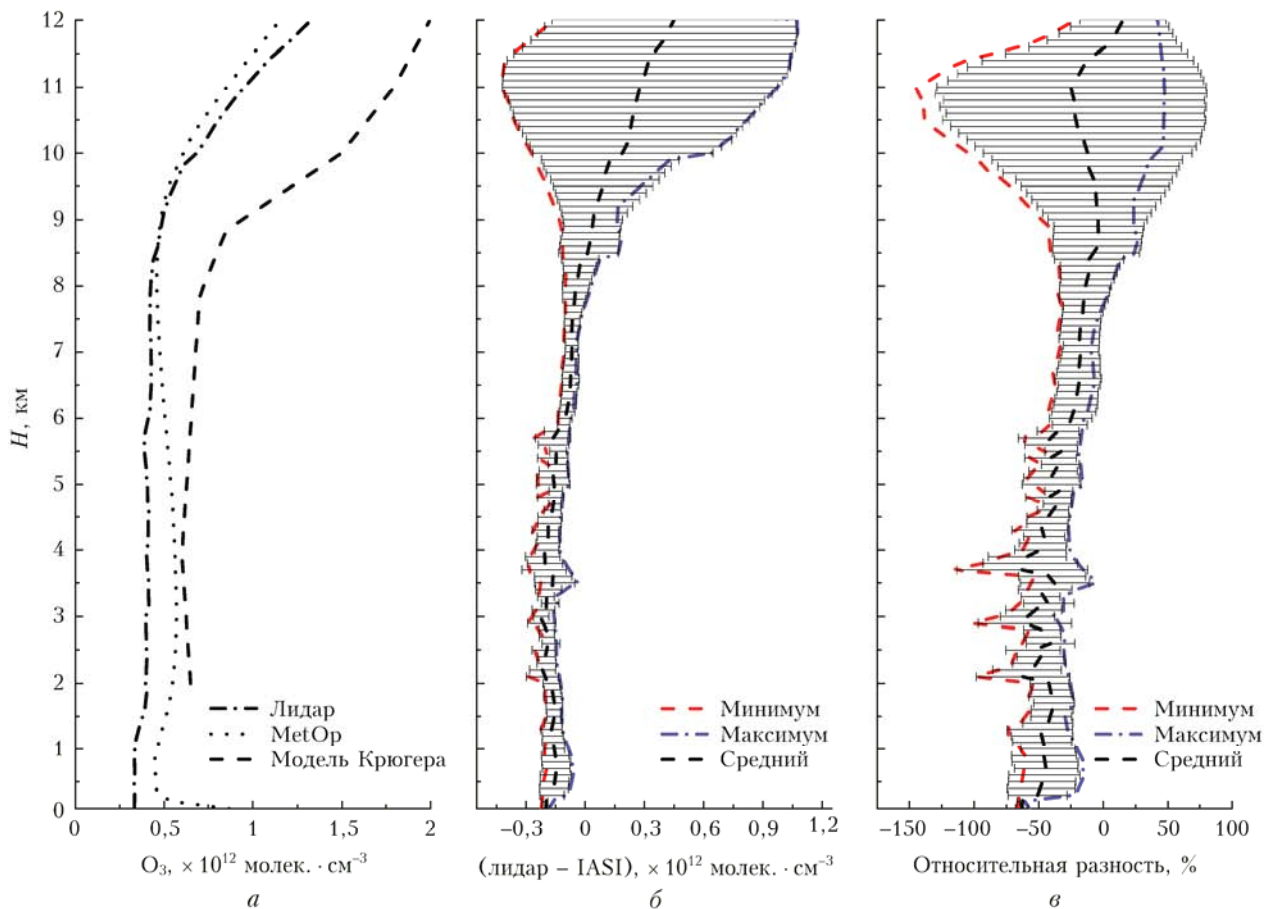


Рис. 3. Средние вертикальные профили: озона (а), разности (лидар – IASI) (б), относительной разности  $100 \times (\text{лидар} - \text{IASI}) / \text{лидар}$  (в); заштрихованная область – коридор среднеквадратического отклонения (см. цв. рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.10>)

## Заключение

Результаты сопоставления восстановленных профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции на базе мобильного лидара и профилей MetOp (IASI) подтверждают хорошие перспективы использования длин волн зондирования озона 299 и 341 нм от приземного слоя до верхней тропосферы в высотном диапазоне  $\sim 0,1\text{--}12$  км и, в частности, в диапазоне  $\sim 0,1\text{--}5$  км. Кроме того, результаты говорят о высокой точности подобных исследований для контроля озона. Стоит отметить, что восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных, чем к модели Крюгера, что подтверждается приведенными примерами. Статистическое завышение концентрации озона спутником MetOp по сравнению с лидарными данными от приземного слоя до тропопавзы, вероятно, связано с использованием некорректной априорной модели озона в алгоритме восстановления ВРО по данным IASI.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 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. Сибирская лидарная станция. Томск, 2024. URL: <http://ckp-rf.ru/usu/73575/> (дата обращения: 28.01.2024).
4. Невзоров А.А., Невзоров А.В., Харченко О.В., Крайцова 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.
5. 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., Levelt 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.

6. Leblanc T., Brewer M.A., Wang P.S., Granados-Muñoz M.J., Strawbridge K.B., Travis M., Firsanski B., Sullivan J.T., McGee T.J., Summicht G.K., Twigg L.W., Berkoff T.A., Carnon 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.
7. MLS product. URL: <https://mls.jpl.nasa.gov> (last access: 05.05.2024).
8. Waters J.W., Froidevaux L., Harwood R.S., Jarnot R.F., Pickett H.M., Read W.G., Siegel P.H., Cofield R.E., Filipiak M.J., Flower D.A., Holden J.R., Lau G.K., Livesey N.J., Manney G.L., Pumphrey H.C., Santee M.L., Wu D.L., Cuddy D.T., Lay R.R., Loo M.S., Perun V.S., Schwartz M.J., Stek P.C., Thurstans R.P., Boyles M.A., Chandra K.M., Chavez M.C., Chen G.-Sh., Chudasama Bh.V., Dodge R., Fuller R.A., Girard M.A., Jiang J.H., Jiang Y., Knosp B.W., LaBelle R.C., Lam J.C., Lee K.A., Miller D., Oswald J.E., Patel N.C., Pukala D.M., Quintero O., Scaff D.M., Van Snyder W., Tope M.C., Wagner P.A., Walch M.J. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura Satellite // *IEEE TGRS Trans. Geosci. Remote Sens.* 2006. V. 44. P. 1075–1092. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.
9. Clerbaux C., Boynard A., Clarisse L., George M., Hadji-Lazaro J., Herbin H., Hurtmans D., Pommier M., Razavi A., Turquety S., Wespes C., Coheur P.-F. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/MetOp sounder // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 16. P. 6041–6054. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/acp-9-6041-2009>.
10. Zou C., Zhou Lihang, Lin Lin, Sun Ninghai, Chen Yong, Flynn L., Zhang Bin, Cao C., Iturbide-Sanchez F., Beck T., Yan B., Kalluri S., Bai Yan, Bloński S., Choi T., Divakarla M., Gu Yalong, Hao X., Li Wei, Liang D., Niu J., Shao X., Strow L., Tobin D., Tremblay D., Upreti S., Wang Wenhui, Xu Hui, Yang Hu, Goldberg M. The reprocessed Suomi NPP Satellite Observations // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 2891. DOI: 10.1109/TGRS.2006.873771.
11. Huang F.T., Mayr H.G. Ozone and temperature decadal solar-cycle responses, and their relation to diurnal variations in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere, based on measurements from SABER on TIMED // *Ann. Geophys.* 2019. V. 37, N 4. P. 471–485. DOI: 10.5194/angeo-37-471-2019.
12. Невзоров А.А., Булаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., 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. DOI: 10.15372/AOO20160812.
13. Gazeaux J., Clerbaux C., George M., Hadji-Lazaro J., Kuttippurath J., Coheur P.-F., Hurtmans D., Deshler T., Kovilakam M., Campbell P., Guidard V., Rabier F., Thépaut J.-N. Intercomparison of polar ozone profiles by IASI/MetOp sounder with 2010 Concordiasi ozonesonde observations // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6. P. 613–620. DOI: 10.5194/amt-6-613-2013.
14. Measures R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*. Malabar: Krieger Publishing Company, 1992. 510 p.
15. Gorshlev V., Serdyuchenko A., Weber M., Chehade W., Burrows J.P. High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 2. P. 609–624. DOI: 10.5194/amt-7-609-2014.
16. Serdyuchenko A., Gorshlev V., Weber M., Chehade W., Burrows J.P. High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 2: Temperature dependence // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 2. P. 625–636. DOI: 10.5194/amt-7-625-2014.
17. Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Romanovskii O.A., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Y.S., Eremina T.A., Kozlov V.S., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Zhuravleva T.B., Bedareva T.V., Odintsov S.L., Burlakov V.D., Nevzorov A.V., Arshinov M.Y., Iulev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladikh V.A., Kamardin A.P., Balin Y.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoilo-va S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Kozlov A.S., Malyshkin S.B. Complex experiment on studying the microphysical, chemical, and optical properties of aerosol particles and estimating the contribution of atmospheric aerosol-to-earth radiation budget // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8, N 10. P. 4507–4520. DOI: 10.5194/amt-8-4507-2015.
18. August T., Klaes D., Schlüssel P., Hultberg T., Crapeau M., Arriaga A., O'Carroll A., Coppens D., Munro R., Calbet X. IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2012. V. 113, N 11. P. 1340–1371. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2012.02.028.
19. 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.

**A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov, N.S. Kravtsova, O.V. Kharchenko, Ya.O. Romanovskii. Comparison of MetOp satellite and mobile lidar ozone profiles.**

Trace atmospheric gases (TAGs) are optically active elements of the atmosphere. TAGs have a great influence on atmospheric processes: transformation of solar radiation, weather formation, air pollution by industrial emissions, and propagation of optical waves. Ozone occupies a special place among TAGs. The ozone layer plays the role of natural protection of the planet from short-wave solar radiation. Therefore, monitoring of the ozoneosphere by ground-based and satellite instruments allows us to obtain the most reliable data on the state of the atmosphere and, in particular, the ozone layer. The solution of this urgent problem is possible only with permanent improvement of the hardware base and perfection of methodological approaches to scientific research of the atmosphere. In this work, a number of measurements were carried out using a mobile ozone lidar at wavelengths of 299/341 nm in the altitude range 0.1–12 km at the Siberian lidar station (SLS). Vertical ozone profiles retrieved from lidar and meteorological satellite data of the European Space Agency (MetOp) obtained in 2023 were compared. The comparisons showed that the average relative difference between the profiles varies from –65.6% to 15.3% at altitudes from 0.1 km to 12 km. The comparison results confirm good prospects for using these ozone sensing wavelengths in the altitude range 0.1–5 km, previously uncovered by the SLS. The results will be used in modeling the vertical distribution of ozone concentration and in assessing the ecological state of the atmosphere in the Tomsk region.