

Сравнение лидарных и спутниковых измерений вертикальных профилей озона по данным 2015 г.

А.А. Невзоров, В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.В. Невзоров,
О.А. Романовский, О.В. Харченко, Ю.В. Гриднев*

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

Поступила в редакцию 11.04.2016 г.

Описана методика восстановления лидарных профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции. Диапазон регистрации лидарных сигналов составил от 5 до 18 км. Проведено сравнение вертикальных профилей озона над г. Томск, полученных в 2015 г. с помощью лидара дифференциального поглощения на Сибирской лидарной станции, и профилей, восстановленных по данным метеорологического спутника Европейского космического агентства (MetOp).

Ключевые слова: лидар, дистанционное зондирование, озон; lidar, remote sensing, ozone.

Введение

Для исследования атмосферы и контроля ее состояния широко используются методы дистанционного лазерного зондирования с применением лидарной техники — лидара или лазерного локатора. При этом наиболее чувствительным из методов, используемых для определения пространственного распределения концентрации какого-либо атмосферного газа, является метод дифференциального поглощения (МДП). В настоящее время лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы, в том числе и озона, по МДП принципиально реализовано [1–6]. Начиная со второй половины 80-х гг. XX в. лазерное зондирование озоносферы приобрело регулярный характер [2–5]. Оно дает информацию о вертикальном распределении озона (ВРО), удачно дополняя подобную информацию, получаемую контактными методами с помощью озонзондов и ракет, а также спутников TOMS, SAGE-II, TERRA, MetOp и др.

Лазерное зондирование вертикального распределения стратосферного озона осуществляется на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск: 56,5° с.ш., 85,0° в.д.) с 1989 г. [6]. Длительный период лидарных наблюдений за стратосферным озоном показал, что наиболее изменчивая часть озоносферы расположена в нижней стратосфере, где озон подвержен влия-

нию динамического фактора. Эта часть полностью определяет изменчивость общего содержания озона в атмосферном столбе. Лидарные измерения профилей ВРО по МДП осуществляются на различных комбинациях длин волн [2–6].

Стоит отметить, что сравнения профилей концентраций атмосферного озона, полученных с помощью интерферометра IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), с профилями, полученными бортовыми компактными лидарными установками на самолетах-лабораториях, озонзондами, наземными лидарами и спектрофотометрами Брюэра–Добсона в пределах тропосферы, проводились и ранее [7–10]. В настоящей статье проводится сравнение лидарных и спутниковых измерений вертикальных профилей озона для верхней тропосферы — нижней стратосферы, где расположен максимум концентрации озона.

Таким образом, целью данной работы является сопоставление восстановленных из лидарных данных наземной DIAL (Differential Absorption Lidar) системы вертикальных профилей озона с профилями, полученными по данным спутникового зондирования интерферометром IASI (MetOp).

1. Аппаратура

Зондирование озона нижней стратосферы — верхней тропосферы проводится на Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН (г. Томск) с 1989 г. В качестве источника лазерного излучения используется четвертая гармоника (266 нм) основной частоты излучения Nd:YAG-лазера (модель LS-2134UT фирмы LOTIS ТП, Минск) с последующим ее ВКР-преобразованием в водороде в первую (299 нм)

* Алексей Алексеевич Невзоров (naa@iao.ru); Владимир Дмитриевич Бурлаков (burakov@iao.ru); Сергей Иванович Долгий (dolgi@iao.ru); Алексей Викторович Невзоров (nevzovov@iao.ru); Олег Анатольевич Романовский (roa@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Юрий Владимирович Гриднев (yugi@iao.ru).

и вторую (341 нм) стоксовые компоненты [11]. Использование этой комбинации длин волн обладает рядом преимуществ. Во-первых, излучение в данном случае реализуется в одном пучке зондирования (в одной ВКР-ячейке), что значительно упрощает процесс юстировки лидара и работу с ним. Во-вторых, система на основе ВКР-ячейки с водородом дешевле, чем, например, на дейтерии. Предварительные расчеты показали, что использование этих длин волн позволяет проводить зондирование до высоты $H = 22$ км, в то время как озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км. Следует отметить также, что при таких измерениях появляется возможность исследования озона в тропосфере [12].

Блок-схема лидара и его подробное описание представлены в статье [13]. Приемный телескоп разработан по схеме Ньютона на основе главного зеркала диаметром 0,5 м с фокусным расстоянием 1,5 м. Регистрирующий тракт лидара укомплектован фотоумножителями (R7207-01) и усилителями-дискриминаторами (С3866) фирмы HAMAMATSU. Регистрация лидарных сигналов ведется в режиме счета импульсов фототока. При давлении водорода 2 атм интенсивности линий 299 и 341 нм сравниваются, что дает возможность зондирования озона при равных энергетиках излучения на этих длинах волн. Однако для увеличения потолка зондирования более эффективно использовать давление 1 атм, так как при этом энергетика перераспределяется в пользу линии 299 нм, которая сильнее поглощается озоном, чем линия 341 нм.

Интерферометр IASI расположен на борту метеорологического спутника Европейского космического агентства (MetOp), ведущего измерения атмосферных составляющих CO_2 , CH_4 , N_2O , CO , O_3 , HNO_3 , а также профилей температуры и влажности в тропосфере и нижней стратосфере в рамках европейской программы European Polar System в режиме, близком к режиму реального времени. IASI обеспечивает получение спектров высокого радиометрического качества с разрешением $0,5 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне от 625 до 2760 см^{-1} [14]. Восстановление профилей озона по данным спутникового зондирования выполняется в диапазоне 1025–1075 см^{-1} .

Спутниковые данные получены с помощью станции приема спутниковой информации 2.4 XLB фирмы Orbital Systems (США), введенной в эксплуатацию в ИОА СО РАН в 2011 г. Получаемая со станции информация позволяет проводить сравнение спутниковых данных с результатами лидарного зондирования на СЛС [15].

2. Методика измерений

В основу методики восстановления лидарных профилей ВРО с учетом температурной и аэрозольной коррекции легло лидарное уравнение [1]:

$$n(H) = \frac{1}{\underbrace{k_{on}(H) - k_{off}(H)}_A} \times$$

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

где $N(H)$ – зарегистрированный эхосигнал в линии поглощения (*on*) и вне линии поглощения (*off*); α^a и α^m – коэффициенты ослабления аэрозольного и молекулярного рассеяния; β^a и β^m – коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния; k – коэффициент поглощения; $n(H)$ – концентрация озона.

Реальные вариации температуры в атмосфере могут вызвать существенные изменения в априорном расчете коэффициента поглощения озона, что приводит к систематическим ошибкам восстановления профилей ВРО. Поэтому в алгоритме восстановления ВРО целесообразно проводить коррекцию на температурную зависимость $k_{on}(H, T)$, $k_{off}(H, T)$. В предложенной нами методике использована зависимость сечения поглощения озона от температуры, полученная по экспериментальным и расчетным данным из работ [16, 17]. Эта зависимость представлена в табл. 1.

Таблица 1

Сечения поглощения озона (см^2) для диапазона 218–295 К на длинах волн зондирования озона [16, 17]

Длина волны, нм	Температура, К				
	218	228	243	273	295
299	<i>on-line</i>				
	$4,1 \cdot 10^{-19}$	$4,1 \cdot 10^{-19}$	$4,25 \cdot 10^{-19}$	$4,3 \cdot 10^{-19}$	$4,6 \cdot 10^{-19}$
341	<i>off-line</i>				
	$6 \cdot 10^{-22}$	$6 \cdot 10^{-22}$	$6 \cdot 10^{-22}$	$6 \cdot 10^{-22}$	$1,2 \cdot 10^{-21}$

При больших значениях аэрозольного наполнения атмосферы обратное аэрозольное рассеяние в несколько раз превышает молекулярное, что при неучтенных рассеивающих и ослабляющих свойствах атмосферы на зондирующих длинах волн дает существенные искажения восстановленного озонового профиля. В разработанной методике восстановления лидарных профилей эти факторы учитываются с помощью алгоритма из работы [18].

Известно, что задача дифференцирования эмпирических функций относится к классу некорректно поставленных задач. Некорректность проявляется в нарушении устойчивости решения, а именно небольшие погрешности в исходных данных могут приводить к большим ошибкам решений, а в ряде случаев к появлению отрицательных значений концентрации газа. В данной методике решения некорректной задачи не приводят к «разбалтываемости» решения восстановленного профиля озона за счет высокой точности проведенных экспериментов, та-

ким образом, ошибка каждого элемента исходных данных минимальна, что существенно для решения подобных задач.

Восстановленные по данным лидарного зондирования профили ВРО сопоставлялись с профилями, полученными с помощью интерферометра IASI метеоспутника MetOp. Для обработки данных IASI использовали стандартные методы обращения спутниковых данных [19].

3. Результаты сопоставления профилей озона, измеренных на СЛС и интерферометром IASI

В течение 2015 г. на станции лидарного зондирования ИОА СО РАН проводились измерения вертикального распределения озона. С использованием представленной выше методики рассчитывались восстановленные профили озона верхней тропосферы — нижней стратосферы и сопоставлялись с профилями, полученными с помощью интерферометра IASI, установленного на борту метеорологического спутника MetOp. Диапазон регистрации лидарных сигналов составил 5–18 км. При этом восстановленные вертикальные профили озона имеют ошибку от 6 до 18%.

Координаты и время лидарного и спутникового зондирования приведены в табл. 2. Лидарные измерения озона над г. Томск проводились в вечернее и ночное время в условиях безоблачного неба.

Таблица 2

Координаты и время спутникового и лидарного зондирования, использованные для сравнения профилей ВРО за 2015 г.

Дата	Лидарная станция (56,5° с.ш., 85,0° в.д.)	Спутник MetOp (IASI)	
	Время по Гринвичу	Время по Гринвичу	Координаты IASI
13.01.2015	11:53–13:45	14:17	56,472° с.ш., 85,387° в.д.
19.02.2015	12:39–14:13	14:53	56,681° с.ш., 85,164° в.д.
5.03.2015	13:05–14:56	15:02	56,472° с.ш., 85,118° в.д.
20.03.2015	13:32–15:24	14:53	56,691° с.ш., 85,124° в.д.
6.04.2015	14:25–16:17	15:41	56,254° с.ш., 84,935° в.д.
26.04.2015	15:11–17:03	15:26	56,585° с.ш., 84,594° в.д.

Пример сопоставления вертикальных профилей озона лидарных и спутниковых измерений, полученных 26 апреля 2015 г., представлен на рис. 1. Профили ВРО приведены в сравнении с моделью Krueger [20]. Все измерения озона представлены в виде трех кривых: восстановленный лидарный

профиль, профиль IASI и модель Krueger. Из рисунка видно, что профили, восстановленные из лидарных и спутниковых данных, достаточно хорошо совпадают на протяжении всего высотного диапазона измерений. Даже при завышенных значениях лидарных измерений в районе 9 и 13 км, их поведение в основном повторяет форму кривой IASI. Выше 7 км измеренные профили отличаются от модельного, что является естественным для динамики озона в отдельные дни наблюдений.

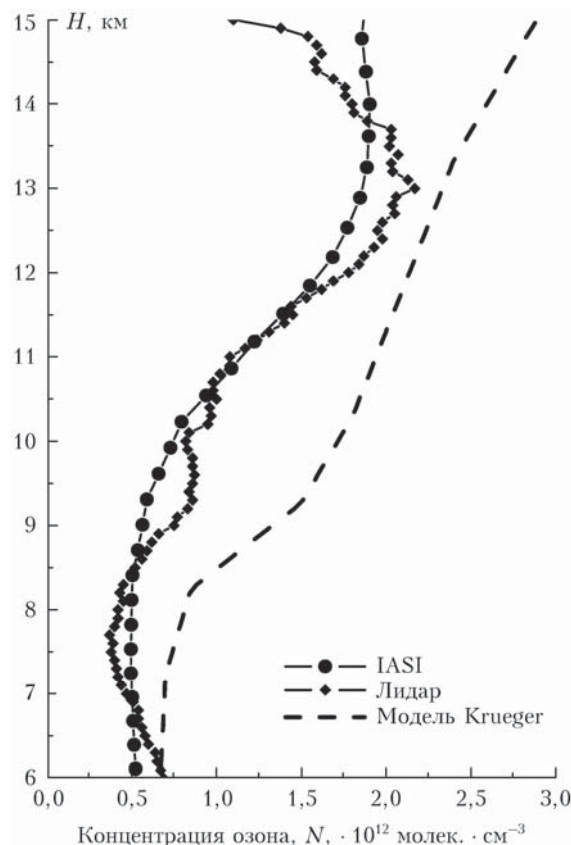


Рис. 1. Сопоставление вертикальных профилей озона, полученных 26.04.2015 из лидарных и спутниковых данных

Следует отметить, что лидар работает в режиме накопления фотонов, пространственное разрешение при этом составляет 100 м, в то время как профиль IASI имеет более динамичный шаг (150 ± 100 м), что связано с алгоритмом восстановления озоновых профилей для этого инструмента [19]. Кривая IASI более гладкая и не описывает детального ВРО, в то время как лидарные измерения более подробно показывают поведение ВРО, что хорошо видно из рис. 1.

На рис. 2 представлены все рассмотренные случаи сопоставления профилей ВРО, измеренных на СЛС и восстановленных по IASI. Измерения приведены к общему высотному диапазону 6–15 км для более удобного сравнения всех профилей. Из рис. 2 видно, что для всего периода наблюдений прослеживается завышение концентраций озона СЛС по сравнению с IASI в диапазоне от 8,5 до 12,5 км.

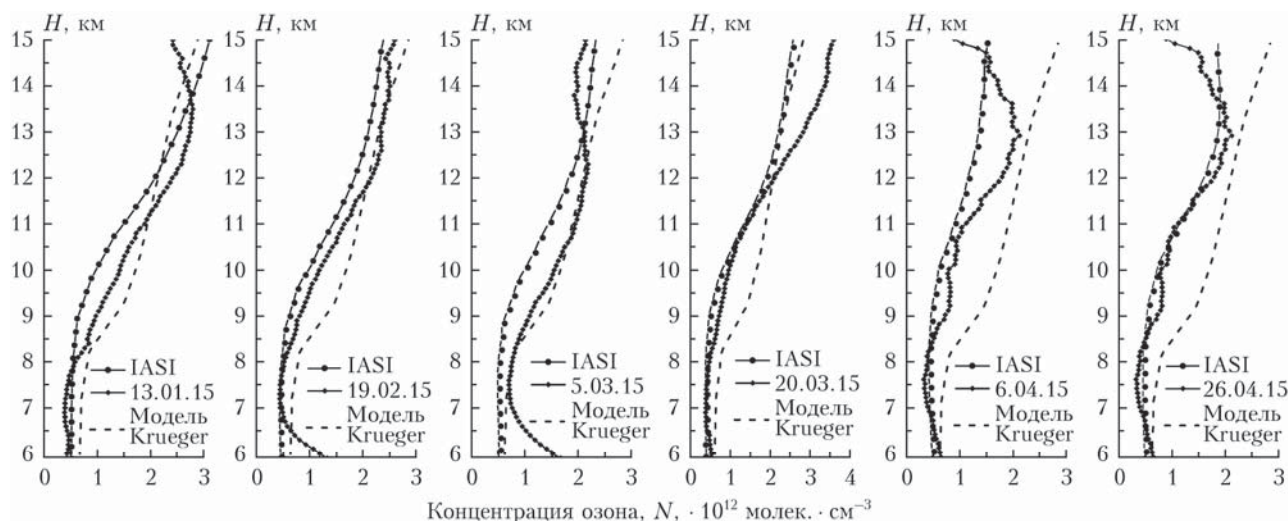


Рис. 2. Сопоставление вертикальных профилей озона, полученных в 2015 г.

Из анализа натуральных данных ВРО за весь рассматриваемый период 2015 г., приведенных на рис. 3, можно сделать следующие выводы. Разница между профилями концентраций (рис. 3, а, б), полученных на лидаре и IASI, растет с увеличением высоты. Вследствие этого средняя разность (лидар – IASI) или отклонение по всем дням измерений в концентрациях озона изменяется от $-0,15 \cdot 10^{12}$ молек. \cdot см^{-3} на высоте 7,2 км до $2,03 \cdot 10^{12}$ молек. \cdot см^{-3} на 13,7 км (рис. 3, б). Максимальное по всем профилям отклонение составляет от $-0,09 \cdot 10^{12}$ молек. \cdot см^{-3} на высоте 7,2 км до $3,21 \cdot 10^{12}$ молек. \cdot см^{-3} на 15 км. Минимальное отклонение также по всем профилям изменяется от $-0,25 \cdot 10^{12}$ молек. \cdot см^{-3} на 7,7 км до $1,65 \cdot 10^{12}$ молек. \cdot см^{-3} на высоте 13 км.

В нашем анализе мы подчеркиваем, что на высотах тропосферы прослеживаются случаи достаточно близкого совпадения профилей, полученных с помощью лидарных и спутниковых данных, в пределах ошибки измерения лидара. При этом на всем интервале высот наблюдается завышение концентраций озона СЛС по сравнению с IASI. Исключение составляет диапазон тропосферы в районах (7–8 км), где лидарные значения меньше спутниковых. В этом случае средняя разность и средняя нормированная разность имеют отрицательные значения, которые представлены на рис. 3, б, в соответственно.

Поскольку озон имеет заметный годовой ход, то для того, чтобы найти относительные погрешности его измерения прибором IASI, разность концентраций нормировали на значения, полученные

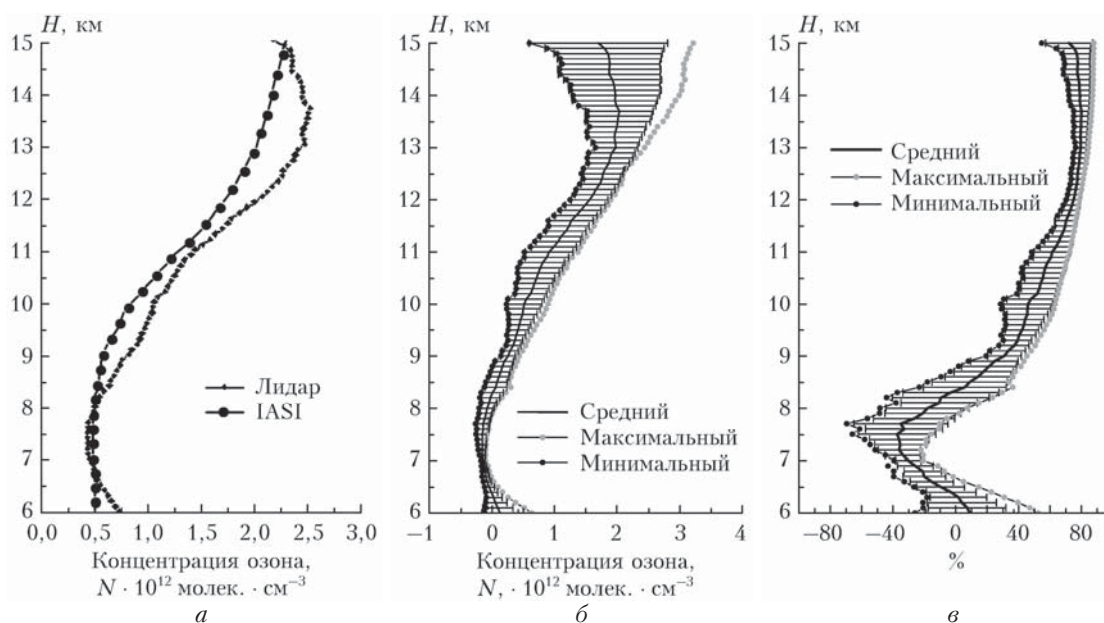


Рис. 3. Средние вертикальные профили озона и их различия: а – средние профили; б – различия концентраций, измеренных лидаром и IASI, в абсолютных единицах; в – относительные разности (лидар – IASI)/лидар

лидаром: (лидар – IASI)/лидар. Эти данные представлены на рис. 3, в, из которого видно, что средняя относительная разность положительна в диапазонах высот 6–6,4 и 8,4–15 км, где достигает 80,07% на высоте 13,7 км.

Средняя относительная разность отрицательна в диапазоне высот от 6,4 до 8,4 км, где достигает максимального отрицательного значения –37,3% на высоте 7,5 км. Максимальная относительная разность изменяется от –22 молек. · см⁻³ до 88,1% в диапазоне 6–15 км. Минимальная по всем профилям относительная разность в этих высотах составляет –69,4% на высоте 7,7 км и достигает 76,4% на 13 км. На высоте 6 км относительная разность варьируется в диапазоне от –25,9 до 52,5%, на 15 км от 54,7 до 88,1%.

Таким образом, проведенное сопоставление показывает, что абсолютные различия концентрации озона, измеренные лидаром и прибором IASI, могут изменяться от –0,25 молек. · см⁻³ до 3,21 · 10¹² молек. · см⁻³, поэтому относительная разность находится в диапазоне –69,4...88,1%.

Заключение

Результаты сопоставления восстановленных профилей вертикального распределения озона с учетом температурной и аэрозольной коррекции в верхней тропосфере – нижней стратосфере на базе DIAL и профилей IASI подтверждают перспективность использования длин волн зондирования озона 299 и 341 нм. Кроме того, результаты сравнения позволяют утверждать высокую приемлемую точность подобных исследований для контроля озона в заданном диапазоне высот. Стоит отметить, что восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных, чем к модели Kueger, что подтверждается приведенными примерами восстановленных профилей DIAL и IASI.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Соглашение № 14-27-00022 в части разработки методики восстановления профилей озона и Соглашение № 15-17-10001 в части сопоставления лидарных и спутниковых профилей озона).

1. Mezheris R. Laser remote sensing. M.: World, 1987. 552 p.
2. Galani E., Balis D., Zanis P., Zerefos C., Papayannis A., Wernli H., Gerasopoulo E. Observations of stratosphere-to-troposphere transport events over the eastern Mediterranean using a ground-based lidar system // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108, N 12. P. STA12-1–STA12-10.
3. Masahisa Nakazato, Tomohiro Nagai, Tetsu Sakai, Yasuo Hirose. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide // Appl. Opt. 2007. V. 46, N 12. P. 2269–2279.
4. Bukreev V.S., Vartapetov S.K., Veselovskii I.A., Galustov A.S., Kozalov Yu.M., Prokhorov A.M., Svetogorov E.S., Khmelevtsov S.S., Lee Ch.H. Excimer-laser-based lidar system for stratospheric and tropospheric ozone measurements // Quantum Electron. 1994. V. 24, N 6. P. 546–551.

5. 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.
6. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Царегородцев С.И. Первые результаты лидарных наблюдений стратосферного озона над Западной Сибирью // Оптика атмосфер. и океана. 1989. Т. 2, № 9. С. 995–996.
7. Pommier M., Clerbaux C., Law K.S., Ancellet G., Bernath P., Coheur P.-F., Hadji-Lazaro J., Hurtmans D., Nedelec P., Paris J.-D., Ravetta F., Ryerson T.B., Schlager H., Weinheimer A.J. Analysis of IASI tropospheric O₃ data over Arctic during POLARCAT campaigns in 2008 // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 16. P. 7371–7389.
8. 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, N 3. P. 613–620.
9. Viatte C., Schneider M., Redondas A., Hase F., Eremenko M., Chelin P., Flaud J.-M., Blumenstock T., Orphal J. Comparison of ground-based FTIR and Brewer O₃ total column with data from two different IASI algorithms and from OMI and GOME-2 satellite instruments // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4, N 3. P. 535–546.
10. Аршинов М.Ю., Афонин С.В., Белан Б.Д., Белов В.В., Груднев Ю.В., Давыдов Д.К., Machida T., Nedelec Ph., Paris J.-D., Фофанов А.В. Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над югом Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 9. С. 773–782.
11. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Макеев А.П., Невзоров А.В., Романовский О.А., Харченко О.В. Лидар дифференциального поглощения для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере // Приборы и техн. эксперим. 2010. № 6. С. 121–124.
12. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Макеев А.П., Матвиенко Г.Г., Невзоров А.В., Солдатов А.Н., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Лидарные технологии дистанционного зондирования параметров атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 10. С. 829–837.
13. Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A. Algorithm for Retrieval of Vertical Distribution of Ozone from DIAL Laser Remote Measurements // Opt. Mem. Neural Networks (Information Optics). 2014. V. 24, N 4. P. 295–302.
14. 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.
15. Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Romanovskii O.A., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovitch S.A., Turchinovitch 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., Ivlev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Balin Y.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoiloa S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Kozlov A.S., Malyskhin 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.
16. *Malicet J., Daumont D., Charbonnier J., Parisse C., Chakir A., Brion J.* Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence // *J. Atmos. Chem.* 1995. V. 21, N 3. P. 263–273.
 17. *Zhu H., Qu Z.W., Grebenshchikov S.Y., Schinke R., Malicet J., Brion J., Daumont D.* The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands // *J. Chem. Phys.* 2005. V. 122, N 2. Article number 024310.
 18. *Ельников А.В., Зуев В.В.* Двухчастотное лазерное зондирование озона стратосферы в условиях ее сильного аэрозольного наполнения // *Оптика атмосф. и океана.* 1992. Т. 5, № 10. P. 1050–1053.
 19. *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.
 20. *Krueger A.J., Minzner R.A.* Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // *J. Geophys. Res. D.* 1976. V. 81, N 24. P. 4477.

A.A. Nevzorov, V.D. Burlakov, S.I. Dolgii, A.V. Nevzorov, O.A. Romanovskii, O.V. Kharchenko, Yu.V. Gridnev. **Comparison of lidar and satellite measurements of vertical ozone profiles using data received in 2015.**

The technique for retrieval of lidar profiles of vertical ozone distribution accounting for temperature and aerosol corrections is described. The range of lidar signal detection is from 5 to 18 km. The vertical ozone profiles measured over Tomsk with a differential absorption lidar of the Siberian Lidar Station in 2015 are compared with the profiles retrieved from ESA MetOp satellite data.