

Валидация численных моделей атмосферы по спутниковым измерениям содержания озона

Я. А. Виролайнен*, Ю. М. Тимофеев*,
И. А. Березин*, С. П. Смышляев**,
М. А. Моцаков**, О. Кирнер***

Проанализированы временные ряды данных измерений содержания озона спутниковым прибором SBUV для трех субарктических станций: Санкт-Петербург, Харестуа и Кируна. Данные о среднедневных и среднемесячных значениях содержания озона в слоях 0–25, 25–60 и 0–60 км сопоставлены с расчетами по численным моделям РГМУ и ЕМАС за период 2000–2015 гг. Модельные данные хорошо согласуются с результатами спутниковых измерений как в среднем, так и в случаях быстрых и кратковременных уменьшений содержания озона. В то же время между данными моделирования и измерений, а также данными двух рассматриваемых моделей наблюдаются различия, требующие более детального анализа с целью уточнения параметров моделей. По экспериментальным данным наблюдается увеличение содержания озона в слое 25–60 км, составляющее $2,1 \pm 0,7$, $2,4 \pm 0,7$ и $1,5 \pm 0,8\%$ за 10 лет для станций Санкт-Петербург, Харестуа и Кируна соответственно. Результаты модельных расчетов не противоречат этим оценкам.

Ключевые слова: численные модели атмосферы, спутниковые измерения SBUV, атмосферный озон.

Введение

Сравнение результатов моделирования пространственно-временных вариаций содержания озона (СО) с данными измерений дает возможность оценить качество модели и провести при необходимости ее уточнение. Усовершенствованные модели в дальнейшем используются для достоверных прогнозов вариаций СО при разных сценариях антропогенных и естественных воздействий на озоносферу. Заблаговременные прогнозы озоновых аномалий важны в связи с тем, что при уменьшении общего содержания озона (ОСО) повышается уровень УФ-облучения поверхности. Эта проблема в последнее время становится актуальной не только для Южного полушария, но и для Северного. Так, зимой 2015/16 г. появление озоновых минидыр наблюдалось над территорией России [2, 3].

* Санкт-Петербургский государственный университет; e-mail: yana.virolainen@spbu.ru.

** Российский государственный гидрометеорологический университет.

*** Технологический институт Карлсруэ, Германия.

Сопоставление результатов моделирования с данными измерений ОСО проводилось неоднократно [1, 7, 8, 10, 15, 16]. Однако рассмотрение только данных измерений ОСО не позволяет объективно идентифицировать фотохимические и динамические факторы, определяющие наблюдаемую сезонную и межгодовую изменчивость содержания озона. Более информативным является сопоставление содержания озона в отдельных слоях атмосферы, так как на разных высотах преобладают разные процессы формирования и трансформации озона [4].

В настоящей работе для проверки качества моделей использованы спутниковые измерения содержания озона с помощью аппаратуры Solar Backscatter Ultraviolet Instrument (SBUV) в разных слоях атмосферы на примере трех субарктических станций за период с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2015 г. Приборы SBUV осуществляют надирные измерения спектров отраженной и рассеянной солнечной радиации в области 250—340 нм при горизонтальном разрешении примерно 200—200 км. Описание прибора, алгоритмов интерпретации и анализ погрешностей измерений можно найти в работе [5]. Точность спутниковых измерений содержания озона в отдельных слоях атмосферы составляет ~5—15%. Рассматриваемые данные SBUV являются некоторыми усредненными среднесуточными величинами (Merged Ozone Data), проинтерполированными на координаты следующих наземных станций: Кируна (67,8° с. ш., 20,4° в. д.), Харестуа (60,2° с. ш., 10,8° в. д.) и Санкт-Петербург (59,9° с. ш., 29,8° в. д.).

С экспериментальными данными сопоставляются результаты расчетов химико-транспортной модели состава нижней и средней атмосферы РГГМУ [4] и химико-климатической модели EMAC (ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry model) [9]. Основное различие между этими моделями заключается в том, что в модели EMAC изменчивость динамических параметров рассчитывалась с использованием ассимиляции результатов реанализа ERA-Interim [6], а в модели РГГМУ в качестве динамических параметров напрямую использовались данные реанализа MERRA [11]. Подробное описание моделей и примеры результатов их использования приведены в статьях [1, 4, 12]. Так как сами измерения для каждой станции, как правило, проводятся примерно в одно и то же определенное время в течение одного-двух часов, то для сопоставления с данными спутниковых измерений результаты моделирования EMAC осреднялись за период ± 2 ч от временного интервала измерений, для модели РГГМУ брались среднесуточные данные.

Анализ проведен как для ОСО, так и для содержания озона в слоях 0—25 и 25—60 км. Указанное разделение обосновывается тем, что содержание озона в слое 25—60 км преимущественно определяется фотохимическими процессами, тогда как в слое 0—25 км оно в основном контролируется динамическими процессами в атмосфере. Таким образом, целью данной работы является проверка качества моделирования коротко- и долгопериодных вариаций как ОСО, так и содержания озона в слоях, в которых изменчивость концентрации озона обусловлена разными физическими факторами.

Общая характеристика результатов сопоставления

В табл. 1 приведены полученные статистические характеристики результатов сопоставления (средние разности D и среднеквадратические отклонения) данных измерений и моделирования на трех наземных станциях для ОСО и содержания озона в двух слоях: 0—25 и 25—60 км. Из данных таблицы по величине коэффициента корреляции K и видно, что модель ЕМАС точнее описывает изменчивость озона, чем модель РГГМУ. В то же время модель ЕМАС сильнее занижает значения ОСО и СО в слое 0—25 км, чем модель РГГМУ. Наименьшие значения разности D модель РГГМУ дает для Санкт-Петербурга; для станции Кируна они наибольшие, особенно для слоя 25—60 км, где модель РГГМУ на 3% завышает содержание озона. Однако изменение знака D для разных слоев может быть также связано с разным распределением озона по слоям в модели и результатах измерений.

На рис. 1 показан сезонный ход среднемесячных значений содержания озона, рассчитанных за весь период 2000—2015 гг., полученный по данным двух моделей и измерений для станций Санкт-Петербург и Кируна. Для станции Харестуа, расположенной на одной широте с Санкт-Петербургом, характерны те же основные особенности временного хода содержания озона, поэтому рисунок не приведен. Данные представлены как для ОСО (рис. 1*д, е*), так и для содержания озона в отдельных слоях.

Таблица 1

Статистические характеристики результатов сопоставления данных измерений и расчетов по моделям ЕМАС и РГГМУ

Модель	Слой, км					
	0—60		0—25		25—60	
		K		K		K
Санкт-Петербург						
ЕМАС	8 ± 15 $2,5 \pm 4,7$	$0,950 \pm 0,001$	10 ± 15 4 ± 6	$0,942 \pm 0,001$	$-1,9 \pm 3,9$ $-1,9 \pm 3,8$	$0,955 \pm 0,001$
РГГМУ	0 ± 22 0 ± 7	$0,901 \pm 0,002$	3 ± 19 1 ± 8	$0,891 \pm 0,003$	$-2,5 \pm 7,6$ $-2,4 \pm 7,4$	$0,836 \pm 0,004$
Харестуа						
ЕМАС	8 ± 16 $2,4 \pm 4,8$	$0,947 \pm 0,001$	11 ± 15 5 ± 7	$0,936 \pm 0,002$	$-2,7 \pm 3,8$ $-2,7 \pm 3,7$	$0,956 \pm 0,001$
РГГМУ	3 ± 23 1 ± 7	$0,891 \pm 0,003$	6 ± 20 3 ± 9	$0,879 \pm 0,003$	-3 ± 8 -3 ± 8	$0,817 \pm 0,004$
Кируна						
ЕМАС	10 ± 15 3 ± 4	$0,964 \pm 0,001$	12 ± 14 5 ± 6	$0,960 \pm 0,001$	$-1,5 \pm 3,9$ $-1,6 \pm 4,0$	$0,944 \pm 0,002$
РГГМУ	4 ± 23 1 ± 7	$0,916 \pm 0,002$	10 ± 20 4 ± 8	$0,908 \pm 0,003$	-6 ± 9 -6 ± 9	$0,783 \pm 0,006$
<p><i>Примечание.</i> — расогласование (средняя разность “измерения минус модель” \pm среднеквадратическое отклонение); числитель — единицы Добсона, знаменатель — проценты); K — коэффициент корреляции.</p>						

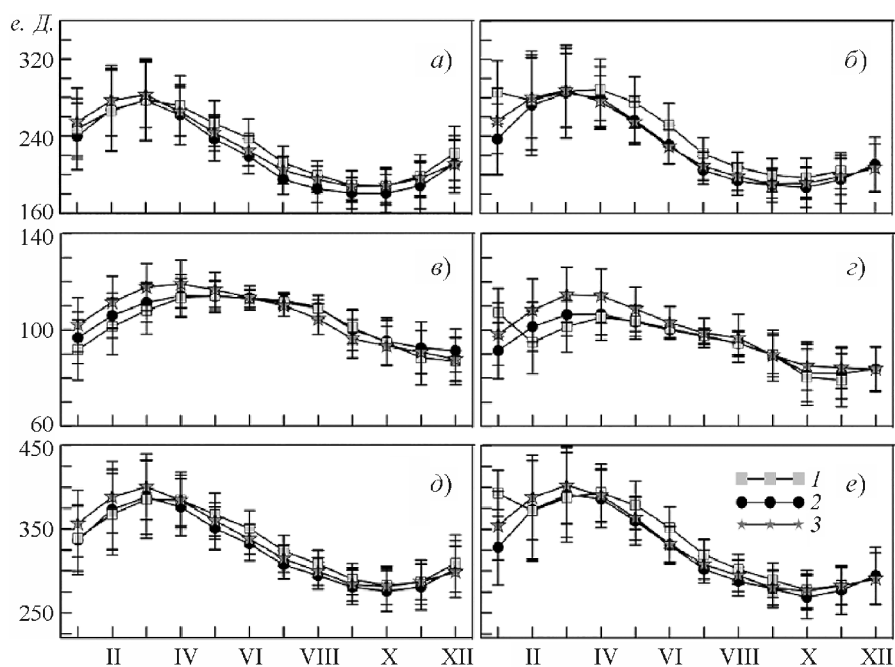


Рис. 1. Сезонный ход среднемесячных значений содержания озона (1 — SBUV, 2 — EMAC, 3 — РГГМУ) для слоев 0—25 (а, б), 25—60 (в, г) и 0—60 км (д, е) на станциях Санкт-Петербург (а, в, д) и Кируна (б, г, е).

Для всех трех станций для ОСО и для СО в слое 0—25 км, содержащем основную массу озона, обе модели в той или иной мере недооценивают содержание озона в период с апреля по октябрь включительно, т. е. модели предсказывают более быстрое уменьшение содержания озона, чем наблюдается по данным SBUV. В декабре и январе практически нет измерений SBUV на станции Кируна, поэтому не сделаны выводы относительно этих месяцев. В остальные месяцы расчеты ОСО по моделям хорошо совпадают с измерениями на всех станциях.

В слое 25—60 км (рис. 1в, г), в котором содержание озона регулируется в основном фотохимическими реакциями, с января по май данные модели РГГМУ превышают как данные модели EMAC, так и данные спутниковых измерений. Модель EMAC хоть и в меньшей степени, но также переоценивает содержание озона в этом слое в первые четыре месяца года.

Периоды быстрых вариаций ОСО

Важное значение для прогнозов увеличения УФ-освещенности поверхности имеет воспроизводимость моделями быстрого и значительного уменьшения ОСО. Анализ экспериментальных данных SBUV позволил выделить за 15-летний период несколько случаев, когда в течение суток ОСО вблизи наземных станций уменьшалось на 20% и более. За 15 лет наблюдений общее число таких случаев на рассматриваемых станциях достаточно мало и составляет от 5 (Санкт-Петербург) до 13 (Харестуа).

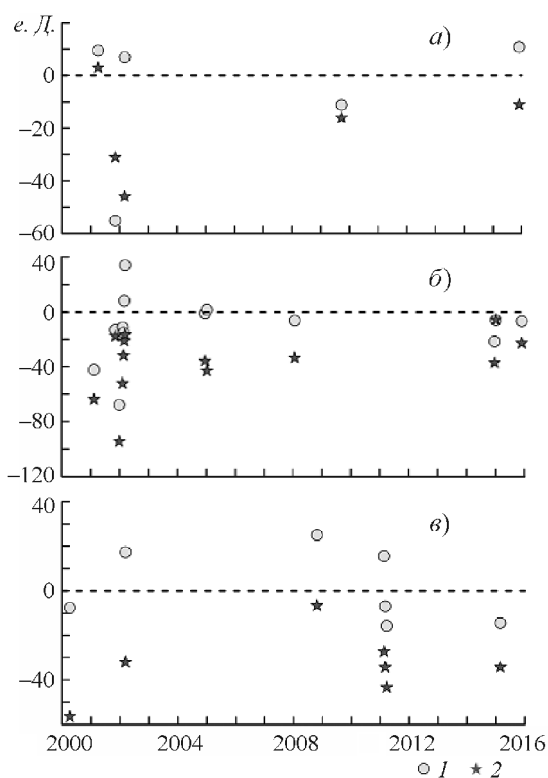


Рис. 2. Разность между данными измерений SBUV и результатами моделирования (1 — EMAC, 2 — РГГМУ) в дни уменьшения ОСО на 20% на станциях Санкт-Петербург (а), Харестуа (б) и Кируна (в).

На рис. 2 приведена разность между данными измерений и результатами моделирования для этих случаев. Как правило, на всех станциях разность между результатами измерений и расчетов по модели EMAC (в среднем около 5 е. Д.) меньше, чем аналогичная разность с данными модели РГГМУ (в среднем около 30 е. Д.), т. е. модель РГГМУ сильнее недооценивает уменьшение содержания озона. В то же время, например, для станции Санкт-Петербург в конце 2001 г. (рис. 2а) модель EMAC сильнее недооценила уменьшение ОСО, чем модель РГГМУ. Также достаточно часто модель EMAC переоценивает уменьшение ОСО для всех станций, что в среднем приближает ее оценки к данным измерений. Даже на таком маленьком ансамбле коэффициенты корреляции между данными моделирования и измерений достаточно высоки (близки к единице), что говорит о том, что обе мо-

дели корректно описывают резкие изменения ОСО, т. е. они чувствительны к быстрому уменьшению ОСО в субарктической атмосфере.

На рис. 3 в качестве примера для трех станций приведены отдельные короткие периоды длительностью несколько недель, во время которых ОСО претерпевало значительные изменения. Можно отметить, что бывают ситуации, в которых модельные расчеты отстают на какое-то время от реального уменьшения содержания озона (пример для станции Санкт-Петербург); бывает, что обе модели неверно описывают пики во временном ходе ОСО или систематически завышают их (пример для станции Харестуа) или обе модели достаточно хорошо описывают изменчивость содержания озона (пример для станции Кируна). В подавляющем большинстве случаев обе модели корректно реагируют на изменение ОСО.

Долговременные тренды содержания озона

Относительно длительный период анализа (15 лет) позволяет оценить долговременные изменения содержания озона. Такие оценки были проведены с помощью простой модели линейной аппроксимации для ОСО и содержания озона в слоях 0—25 и 25—60 км для всех временных рядов (табл. 2).

Прежде всего отметим, что полученные тренды близки к нулевым для всех рассмотренных случаев и часто меньше погрешностей их расчета. По спутниковым данным SBUV наблюдается незначительный отрицательный тренд в слое 0—25 км (1,68% за 10 лет) на станции Санкт-Петербург, для слоя 25—60 км — небольшой положительный тренд (2,1% за 10 лет). Отметим, что по данным SBUV наблюдается небольшой положительный тренд содержания озона в этом слое для всех станций, минимальный для Кируны и максимальный для Харестуа. В то же время только для станции Харестуа модели также дают статистически значимый положительный тренд в этом слое, однако его значение существенно меньше, чем получаемое по спутниковым данным. Для ОСО все полученные оценки тренда являются статистически незначимыми. С учетом величин погрешностей расчетов трендов можно сказать, что в целом и измерения, и результаты моделирования указывают на очень малые тренды содержания озона в районе рассматриваемых наземных субарктических станций в период 2000—2015 гг. В работе [14] на основе анализа наземных измерений содержания озона Фурье-спектрометрами Bruker было показано, что с 1995 по 2012 г. для станции Харестуа и с 1996 по 2012 г. для станции Кируна не наблюдается каких-либо значимых трендов ОСО. Отметим, что на станции Петергоф, в окрестностях Санкт-Петербурга, с 2009 г. также проводятся измерения ОСО с помощью Фурье-спектрометра Bruker 125HR [1, 13], оценки за период с 2009 по 2016 г. по наземным измерениям на этой станции также показали отсутствие статистически значимых трендов ОСО.

Основные результаты и выводы

Для периода 2000—2015 гг. исследованы временные вариации содержания озона в двух слоях (0—25 и 25—60 км), а также ОСО в трех пунктах наблюдений в субарктике (Санкт-Петербург, Харестуа и Кируна) по данным измерений аппаратурой SBUV и расчетам моделей РГГМУ и ЕМАС.

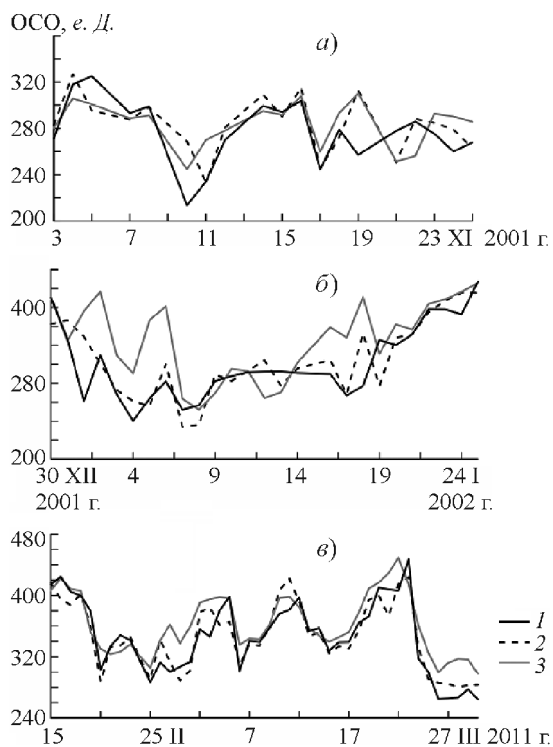


Рис. 3. Временной ход общего содержания озона по данным спутниковых измерений SBUV (1) и данным моделей ЕМАС (2) и РГГМУ (3) в отдельные периоды значительного изменения ОСО на станциях Санкт-Петербург (а), Харестуа (б) и Кируна (в).

Таблица 2

Количественные характеристики трендов за 2000—2015 гг. средненежных значений содержания озона, измеренных спутниковым прибором SBUV над разными наземными станциями, а также неопределенность трендов на 95%-ном доверительном интервале

Станция	Слой, км					
	0—25		25—60		0—60	
	<i>е. Д./год</i>	<i>%/10 лет</i>	<i>е. Д./год</i>	<i>%/10 лет</i>	<i>е. Д./год</i>	<i>%/10 лет</i>
Санкт-Петербург	-0,39 ± 0,24	-1,68 ± 1,03	0,22 ± 0,07	2,1 ± 0,7	-0,17 ± 0,27	-0,51 ± 0,81
Харестуа	-0,02 ± 0,23	-0,07 ± 1,02	0,25 ± 0,07	2,4 ± 0,7	0,23 ± 0,27	0,7 ± 0,80
Кируна	-0,20 ± 0,30	-0,82 ± 1,25	0,14 ± 0,08	1,48 ± 0,78	-0,06 ± 0,35	-0,17 ± 1,04

Примечание. Выделены статистически значимые оценки.

В целом результаты численных расчетов хорошо согласуются с данными спутниковых измерений содержания озона. Корреляция между данными измерений и результатами расчетов по модели ЕМАС составляет 0,95—0,96, по модели РГГМУ — 0,78—0,84. В то же время модель ЕМАС сильнее занижает значения ОСО и содержание озона в слое 0—25 км (на 2,5—5%), чем модель РГГМУ (на 0—4%). Абсолютные значения разности между данными измерений SBUV и результатами расчета по модели РГГМУ меньше всего для Санкт-Петербурга (0—3 *е. Д.*), больше всего — для станции Кируна (4—10 *е. Д.*). Для модели ЕМАС эта разность также минимальна для Санкт-Петербурга (2—10 *е. Д.*).

Анализ среднемесячных значений содержания озона показал, что обе модели на 5—10 *е. Д.* недооценивают значения ОСО и содержание озона в слое 0—25 км в период с апреля по октябрь включительно. В остальные месяцы расчеты ОСО по модели ЕМАС хорошо совпадают с измерениями на всех трех станциях. В то же время в январе — марте данные модели РГГМУ об ОСО превышают как данные модели ЕМАС (на 10—20 *е. Д.*), так и данные спутниковых измерений (на 10—15 *е. Д.*). В слое 25—60 км, в котором содержание озона регулируется в основном фотохимическими реакциями, модельные значения СО превышают экспериментальные данные в первые четыре месяца года: рассчитанные по модели ЕМАС — на 1—4 *е. Д.*, по модели РГГМУ — на 7—10 *е. Д.*

Обе модели достаточно хорошо описывают случаи быстрого уменьшения ОСО, что важно для прогнозирования увеличения УФ-освещенности поверхности. Модель РГГМУ часто недооценивает уменьшение ОСО (иногда до 35 *е. Д.*), для модели ЕМАС эта недооценка в среднем составляет 10 *е. Д.* (Санкт-Петербург и Харестуа), на станции Кируна модель ЕМАС даже переоценивает уменьшение ОСО.

Оценки долговременных трендов содержания озона за период 2000—2015 гг. показали, что с учетом погрешностей расчетов трендов и модельные, и экспериментальные результаты указывают на очень малые изменения СО на рассматриваемых субарктических станциях. Из достоверных оценок укажем на уменьшение содержания озона в слое 0—25 км ($-1,68 \pm \pm 1,03\%$ за 10 лет), а также на его увеличение ($2,1 \pm 0,7\%$ за 10 лет) в слое 25—60 км по данным SBUV в Санкт-Петербурге. Для станций Харестуа и

Кируна по данным измерений также наблюдается увеличение содержания озона в слое 25—60 км: на $2,4 \pm 0,7$ и $1,5 \pm 0,8\%$ за 10 лет соответственно. Модельные результаты не противоречат этим оценкам.

Таким образом, обе модели могут быть использованы для прогнозирования, анализа и оценок кратковременных и долговременных вариаций содержания озона в субарктических широтах.

Сбор и анализ данных профинансированы Российским научным фондом (грант № 14-17-00096). Сопоставление с данными модели EMAC проведено при поддержке гранта СПбГУ 11.42.1057.2016.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Литература

- 1. Виролайнен Я. А., Тимофеев Ю. М., Поляков А. В. и др.** Сопоставление наземных измерений общего содержания O_3 , HNO_3 , $HC1$ и NO_2 с данными численного моделирования. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2016, т. 52, № 1, с. 64—73.
- 2. Звягинцев А. М., Иванова Н. С., Никифорова М. П. и др.** Содержание озона над территорией Российской Федерации в первом квартале 2016 г. — Метеорология и гидрология, 2016, № 5, с. 122—128.
- 3. Никифорова М. П., Варгин П. Н., Звягинцев А. М. и др.** Озоновая “мини-дыра” над севером Урала и Сибири. — Труды Гидрометцентра России, 2016, вып. 360, с. 168—180.
- 4. Смышляев С. П., Виролайнен Я. А., Моцаков М. А. и др.** Межгодовые и сезонные вариации интегрального содержания озона в разных высотных слоях вблизи Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования. — Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2017, т. 53, № 3.
- 5. Bhartiya P. K., McPeters R. D., Flynn L. E., et al.** Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm. — Atmos. Meas. Tech., 2013, vol. 6, pp. 2533—2548.
- 6. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., et al.** The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2011, vol. 137, pp. 553—597.
- 7. Egorova T., Rozanov E., Zubov V., et al.** Chemistry-climate model SOCOL: A validation of the present-day climatology. — Atmos. Chem. Phys., 2005, vol. 5, pp. 1557—1576.
- 8. Eyring V., Butchart N., Waugh D. W., et al.** Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry climate model simulations of the recent past. — J. Geophys. Res., 2006, vol. 111, D22308; doi: 10.1029/2006JD007327.
- 9. Jockel P., Tost H., Pozzer A., et al.** The atmospheric chemistry general circulation model ECHAM5/MESy1: Consistent simulation of ozone from the surface to the mesosphere. — Atmos. Chem. Phys., 2006, vol. 6, pp. 5067—5104.
- 10. Pendlebury D., Plummer D., Scinocca J., et al.** Comparison of the CMAM30 data set with ACE-FTS and OSIRIS: Polar regions. — Atmos. Chem. Phys., 2015, vol. 15, pp. 12465—12485.
- 11. Rienecker M. M., Suarez M. J., Gelaro R., et al.** MERRA: NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for research and applications. — J. Climate, 2011, vol. 24, pp. 3624—3648.
- 12. Righi M., Eyring V., Gottschaldt K.-D., et al.** Quantitative evaluation of ozone and selected climate parameters in a set of EMAC simulations. — Geosci. Model Dev., 2015, vol. 8, pp. 733—768.
- 13. Timofeyev Y., Virolainen Y., Makarova M., et al.** Ground-based spectroscopic measurements of atmospheric gas composition near Saint Petersburg (Russia). — J. Mol. Spectr., 2016, vol. 323, pp. 2—14.
- 14. Vigouroux C., Blumenstock T., Coffey M., et al.** Trends of ozone total columns and vertical distribution from FTIR observations at eight NDACC stations around the globe. — Atmos. Chem. Phys., 2015, vol. 15, pp. 2915—2933.
- 15. Wauben W. M. F., Fortuin J. P. F., van Velthoven P. F. J., and Kelder H. M.** Comparison of modeled ozone distributions with sonde and satellite observations. — J. Geophys. Res., 1998, vol. 103, No. D3, pp. 3511—3530.
- 16. WMO.** Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 50. — Geneva, WMO, 2007.