

Озон над Санкт-Петербургом: сопоставление экспериментальных и модельных данных

Ю.М. Тимофеев¹, Я.А. Виролайнен¹, С.П. Смышляев², М.А. Моцаков^{2*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² Российский государственный гидрометеорологический университет
195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

Поступила в редакцию 16.03.2016 г.

Сопоставления результатов моделирования полей содержания озона в атмосфере с данными различных типов измерений позволяют оценить качество моделей для использования их в достоверных прогнозах изменений озонового слоя. Проведены сопоставления спутниковых и наземных измерений содержания озона в двух атмосферных слоях (0–25 и 25–60 км) с данными численного моделирования с помощью модели состава нижней и средней атмосферы для района Санкт-Петербурга. Сравнивались среднедневные и среднемесячные значения содержания озона в течение 3,5 лет (июнь 2011 – декабрь 2014 гг.). В целом согласие экспериментальных и модельных значений содержания озона в двух слоях хорошее или удовлетворительное. Тем не менее обнаружены систематические отличия спутниковых и наземных данных от результатов моделирования. Модель завышает озон по сравнению со спутниковыми измерениями в осенне-зимний период в слое 0–25 км и занижает озон в слое 25–60 км в тот же период. Эти особенности проявляются и при сравнениях среднемесячных значений. Модель в ряде случаев демонстрирует сильные и «высокочастотные» колебания озона, не всегда зарегистрированные в измерениях.

Ключевые слова: атмосферный озон, модели атмосферы, дистанционные методы измерений; atmospheric ozone, atmospheric models, remote sensing methods.

Введение

Сравнения результатов моделирования пространственно-временных вариаций содержания озона с данными различных измерений позволяют оценить качество модели и провести ее уточнения, что дает возможность использовать модели для достоверных прогнозов изменений озоносферы при различных сценариях антропогенных и естественных воздействий на нее. Подобные сравнения с измерениями общего содержания озона (ОСО) проводились неоднократно (см, например, [1–7]). Рассмотрение только данных ОСО не позволяет выделить все высотные характеристики изменчивости содержания озона, а также объективно идентифицировать фотохимические и динамические факторы, определяющие особенности наблюдаемой сезонной и межгодовой изменчивости. Более информативными являются сравнения для отдельных слоев атмосферы, так как на разных высотах преобладают разные процессы формирования и трансформации озона.

В настоящей статье анализируются результаты сопоставления измеренных и смоделированных дан-

ных по содержанию озона в двух атмосферных слоях: 0–25 и 25–60 км. Сравнения проведены как для среднесуточных значений (что важно, например, для прогнозов появления озоновых «мини-дыр» и повышения УФ-освещенности поверхности), а также для среднемесячных значений содержания озона (что актуально для климатологических исследований).

Измерения

В работе анализируются два типа измерений озона – спутниковые и наземные. В качестве спутниковых измерений использовались данные измерений прибором Solar Backscatter Ultraviolet Instrument (SBUV), который позволяет измерять как ОСО, так и содержание озона в различных высотных слоях. Приборы типа SBUV измеряют спектры рассеянного и отраженного солнечного излучения в УФ-области [8]. Описания прибора, алгоритмов интерпретации и анализ погрешностей измерений приведены, например, в работе [9]. Отметим, что с 1970 г. для мониторинга озоносферы использовались уже десять приборов SBUV на различных спутниках, и методики калибровки прибора и интерпретации хорошо отработаны. Приборы SBUV осуществляют надирные измерения спектров в области 250–340 нм при горизонтальном разрешении примерно 200 × 200 км. Точность спутниковых измерений рассмотрена во многих работах

* Юрий Михайлович Тимофеев (y.timofeev@spbu.ru); Яна Акселевна Виролайнен (yana.virolainen@spbu.ru); Сергей Павлович Смышляев (smyshl@rshu.ru); Максим Анатольевич Моцаков (maxm@rshu.ru).

(см., например, [9, 10]), в которых показано, что погрешности определения содержания озона в толстых слоях не зависят существенно от влияния качества априорной информации и составляют 5–15%.

Наземные измерения содержания озона проводились на станции Петергоф вблизи Санкт-Петербурга (координаты 59,88° с.ш., 29,82° в.д.) с помощью спектрального комплекса на базе Фурье-спектрометра (ФС) Bruker 125HR [11]. Эти измерения основаны на интерпретации спектров прямого ИК солнечного излучения высокого спектрального разрешения. ОСО и элементы вертикального профиля озона (содержания в отдельных слоях) определялись по измерениям в пять «микроокон» в интервале 991–1014 см⁻¹ (см. подробнее [12]). Сравнения наземных измерений с различными независимыми, в том числе спутниковыми, измерениями приведены в работах [13, 14], где показано, что наземные и спутниковые измерения содержания озона в различных слоях атмосферы согласованы в пределах 5–17%.

Пространственные и временные требования при отборе данных измерений были довольно мягкими, чтобы получить достаточно представительные ансамбли для сравнений. Наземные ИК-измерения проводились при наличии прямого солнечного излучения (безоблачная атмосфера или большие разрывы в облаках). Поскольку спутниковые измерения над Санкт-Петербургом приходились на 10–11 ч по Гринвичу, для наземных измерений мы брали средние данные за период с 8 до 14 ч. Используемые в сопоставлениях спутниковые измерения SBUV версии MOD (Merged Ozone Data) интегрированы и интерполированы для координат станции пос. Воейково (59,97° с.ш., 30,30° в.д.).

Модель

Для изучения высотных и временных особенностей изменчивости содержания озона проводились численные эксперименты с глобальной моделью состава нижней и средней атмосферы (МНСА). Модель была создана на основе химико-климатической модели Института вычислительной математики РАН и Российского государственного гидрометеорологического университета [15] и ранее успешно применялась для решения задач, связанных с взаимодействием физических и химических процессов в атмосфере [16–18].

В отличие от химико-климатической модели, в МНСА поля ветра, температуры, влажности и давления не рассчитываются, а задаются по данным реанализа. В настоящем исследовании использовались данные реанализа MERRA (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) [19]. Модель МНСА охватывает высотный диапазон 0–60 км, учитывает изменчивость 74 малых газов атмосферы, взаимодействующих в 174 химических реакциях и 46 реакциях фотодиссоциации. Использование данных реанализа [19], представляющих собой согласованный с помощью гидродинамической модели учет большого количества наземных

и спутниковых измерений, позволяет промоделировать реакцию содержания озона на реально наблюдаемую изменчивость динамических характеристик атмосферы.

Несмотря на то что предметом исследования настоящей работы является локальная изменчивость содержания озона, длительный период анализа требует учета влияния процессов, имеющих близкий к глобальному масштаб. В этой связи для представленного в настоящей статье анализа использовалась глобальная версия МНСА, что позволило учесть влияние процессов глобального масштаба на изменчивость содержания озона вблизи Санкт-Петербурга, однако, в связи с достаточно грубым горизонтальным разрешением глобальной модели (около 300 × 400 км для исследуемого региона), это привело к существенному осреднению результатов моделирования. Между тем последнее обстоятельство в качестве дополнительного результата позволяет оценить, насколько локальные наземные измерения соответствуют изменчивости озона, характерной для региона в целом, тем более что спутниковые измерения SBUV также привязаны к другой точке исследуемого региона.

Модельные эксперименты, используемые в настоящей работе, относятся к 2011–2014 гг. Изменения потоков газов с подстилающей поверхности, содержания аэрозоля, температуры поверхности океана и площади покрытия льдом задавались на основании сценариев Всемирной метеорологической организации, используемых при оценках изменения озонового слоя Земли [20]. Анализ и сравнению в данной статье подвергались среднесуточные значения содержания озона в двух атмосферных слоях — 0–25 и 25–60 км.

Сравнение результатов моделирования и измерений

При сопоставлении данных моделирования и измерений важно установить критерии хорошего, удовлетворительного и неудовлетворительного согласия. Эти критерии зависят в определенной степени от погрешностей используемых измерений, пространственно-временных вариаций поля озона и возникающих отличий из-за пространственной и временной рассогласованности различных данных. Примем, что для нижнего слоя с содержанием ~200–300 е.Д. хорошее, удовлетворительное и неудовлетворительное согласие модели и измерений соответствуют 5, 10 и 15% и более (10–15, 20–30 и 30–45 е.Д. и более) соответственно. Для верхнего слоя с содержанием ~100 е.Д. соответствующие величины будут 5, 10 и 15 е.Д. и более.

Для слоя 0–25 км неудовлетворительное согласие между измерениями и моделированием наблюдается в осенне-зимне-весенние периоды, в частности в ноябре 2011 — марте 2012, январе–марте 2013, декабре 2013 — марте 2014, декабре 2014 г. При этом моделирование демонстрирует в среднем более высокие значения содержания озона, чем измерения.

Вне указанных периодов согласие между измерениями и модельными значениями хорошее и удовлетворительное — как правило, рассогласования не превышают 20–30 е.Д. При этом можно отметить, что в ряде периодов общие тенденции изменения содержания озона, в том числе его кратковременные вариации, согласуются очень хорошо. В то же время иногда отмечаются значительные рассогласования (до 80 е.Д.) между спутниковыми измерениями и моделированием, но как показал дополнительный анализ, это обусловлено пространственно-временным рассогласованием данных, что подтверждают измерения других спутниковых приборов.

Отметим, что в ряде случаев наблюдаются значительные отличия между наземными и спутниковыми измерениями, что может также означать влияние пространственно-временной рассогласованности разных данных. В ряде периодов присутствуют «высокочастотные» вариации озона как по данным модели, так и отчасти по спутниковым измерениям. Отдельные максимумы и минимумы прекрасно воспроизводятся по разным данным, но не во всех случаях. На рис. 1 показан пример значительных расхождений между данными моделирования и измерений, когда относительные рассогласования в слое 0–25 км достигают 20–25% (июль–октябрь 2013).

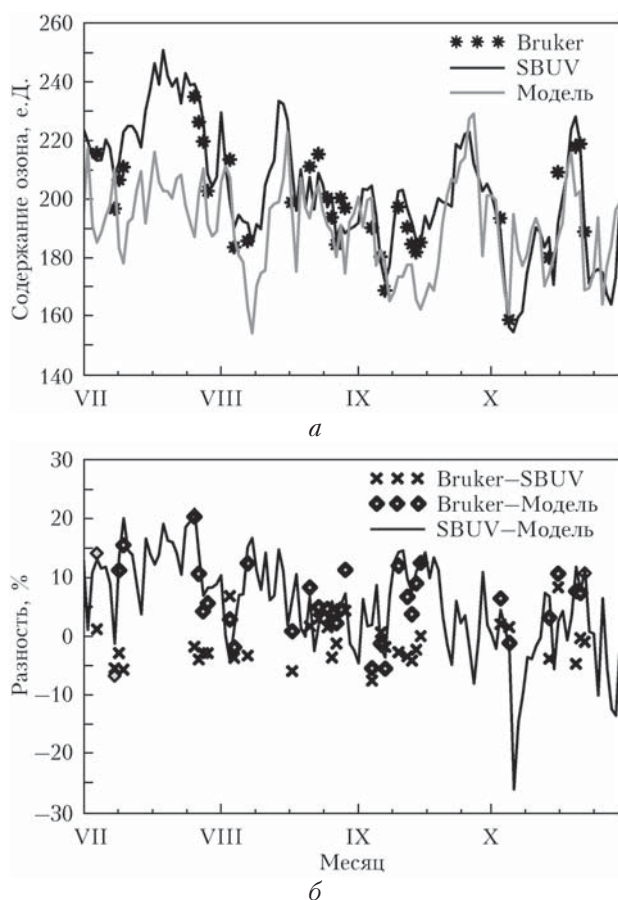


Рис. 1. Среднедневные значения содержания озона в слое 0–25 км, полученные по данным измерений и моделирования (а), а также их разность (б)

При этом спутниковые и наземные измерения достаточно хорошо согласуются друг с другом (в пределах 5–7%).

Для слоя 25–60 км отличия между экспериментальными и модельными значениями озона в большинстве случаев составляют 5–15 е.Д. В большинстве случаев все данные хорошо описывают тенденции изменений содержания озона, а также во многих случаях — кратковременные вариации озона. К неудовлетворительному согласию следует отнести следующие периоды сравнения: ноябрь 2011 — январь 2012, ноябрь–декабрь 2012, декабрь 2013 — март 2014, декабрь 2014 г. Как правило, в эти периоды модель занижает содержание озона в этом слое. В летние месяцы (например, июне–июле 2012 г.) модель прогнозирует большие значения озона, чем данные измерений. Отметим, что разница между наземными и спутниковыми измерениями иногда отрицательна, а иногда положительна. Амплитуды изменений содержания озона в рассматриваемом слое часто меньше в результатах измерений по сравнению с результатами моделирования. Амплитуда «высокочастотных» вариаций озона у модели достигает 20–25 е.Д., которые не всегда регистрируются в измерениях. Рис. 2 демонстрирует один из случаев (февраль–июнь 2012 г.), когда смоделированные значения содержания озона в слое 25–60 км лучше согласованы

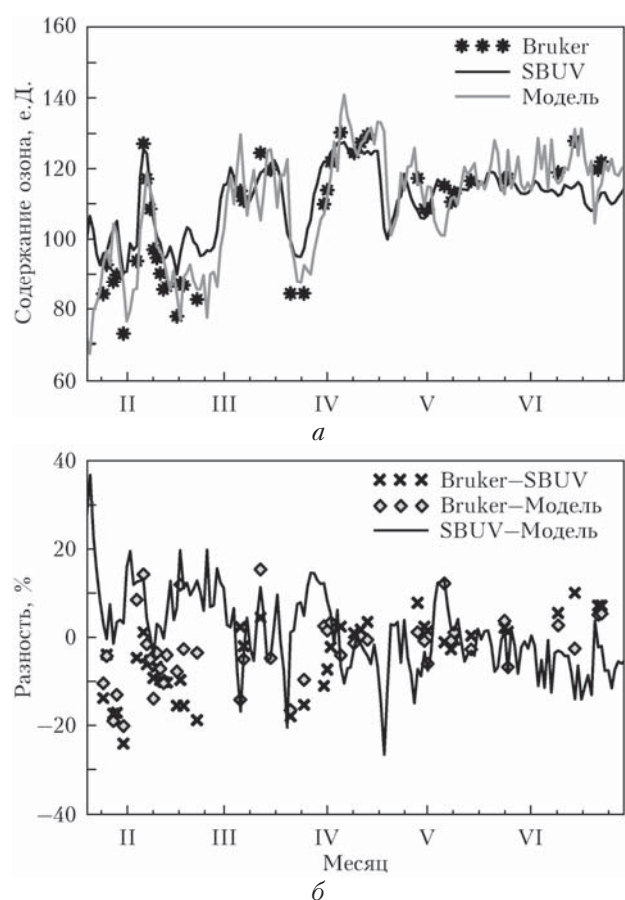


Рис. 2. Среднедневные значения содержания озона в слое 25–60 км, полученные по данным измерений и моделирования (а), а также их разность (б)

с наземными измерениями, чем со спутниковыми. Это также может быть связано с пространственной неоднородностью поля озона, ведь наземные и спутниковые измерения разнесены по пространству, а данные моделирования представляют из себя горизонтально осредненные значения.

Анализ результатов

Сравнения содержания озона по данным моделирования и измерений (спутниковыми и наземными методами) показали в целом хорошее и удовлетворительное согласие временных изменений и вариаций озона в слоях 0–25 и 25–60 км за исключением отдельных периодов. Но имеются периоды наличия явных систематических расхождений между спутниковыми и модельными значениями озона. Отметим, что определенную роль в обнаруженных заметных отличиях могут сыграть довольно мягкие критерии пространственно-временного согласования спутниковых и модельных данных, использованные при их отборе.

По сравнению со спутниковыми измерениями наиболее часто модель завышает величины содержания озона в слое 0–25 км в осенне-зимний период – это наблюдалось в пяти из семи рассмотренных полугодий. В то же время иногда модель занижает содержание озона в этом слое, например летом 2013 и 2014 гг. В слое 25–60 км модель очень часто занижает озон в осенне-зимние периоды – в шести из семи рассмотренных полугодий. Таким образом, в осенне-зимние периоды модель завышает озон в слое 0–25 км и занижает озон в слое 25–60 км. Это наглядный пример ценности изучения сравнения содержания озона в различных слоях атмосферы – в общем содержании озона этот эффект трудно обнаружить.

Модель в ряде случаев дает сильные и «высоко-частотные» колебания озона. Иногда их регистрируют спутниковые измерения, но не всегда. Укажем на случаи плохого описания моделью спутниковых вариаций: слой 0–25 км – ноябрь 2011, январь 2012, май 2013, июль 2013, январь–апрель 2014, ноябрь–декабрь 2014 г.; слой 25–60 км – июль 2012, октябрь 2012, январь–февраль 2013, август–сентябрь 2013, декабрь 2013, сентябрь 2014 г.

Описанные выше систематические отличия наглядно проявляются при сравнениях среднемесячных значений содержания озона в исследуемых слоях (рис. 3). Видно, что для слоя 0–25 км в зимние месяцы модель заметно превышает спутниковые данные, а для слоя 25–60 км наблюдается обратная картина. Кроме того, модель, как правило, демонстрирует большую сезонную изменчивость содержания озона по сравнению со спутниковыми измерениями. Из-за особенностей наземных измерений (только в солнечную погоду) в отдельные месяцы (обычно осенью и зимой) может быть всего несколько дней с данными, поэтому среднемесячные значения показывают большую изменчивость, чем остальные данные в этот период, и не полностью отражают картину сезонного цикла содержания озона. В то же время

в весенние и летние месяцы количество дней измерений статистически значимо для получения среднемесячных значений, поэтому здесь мы наблюдаем схожие результаты с данными других ансамблей.

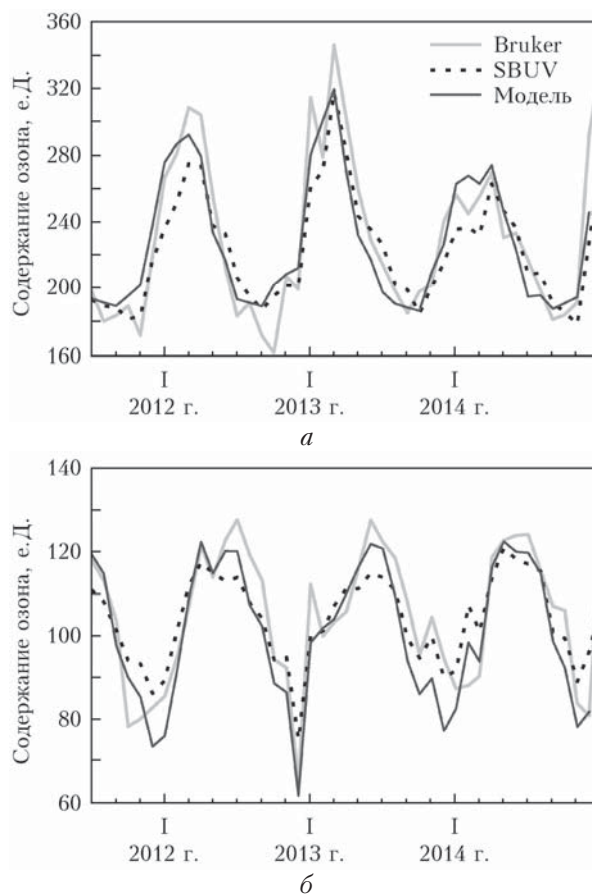


Рис. 3. Среднемесячные значения содержания озона, полученные по данным измерений и моделирования, в слое 0–25 (а) и 25–60 км (б)

Рассмотрим некоторые статистические характеристики проведенных сопоставлений. В табл. 1 приведены характеристики сравнения измерений озона различными приборами между собой и с результатами моделирования для слоя 0–25 км.

Во всех трех ансамблях хорошо согласуется изменчивость содержания озона в слое (около 20%). ФС Bruker в среднем завышает содержание озона по сравнению со SBUV на 4% (10 е.Д.), по сравнению с модельными данными – на 1,7% (4 е.Д.). При этом стандартное отклонение от средних рассогласований между двумя типами измерений находится в пределах точности измерений каждого из методов. Отметим очень высокий коэффициент корреляции между двумя типами измерений – 0,954. Рассогласования превышают уровень, обычно достигаемый в программах валидации спутниковых и наземных измерений (см., например, [12–14]), но следует учесть, что при формировании ансамблей сравнений и анализа использовались достаточно мягкие требования по пространственно-временному согласию разных данных.

Т а б л и ц а 1

Статистические характеристики сравнений ансамблей измерений содержания озона в слое 0–25 км (нижняя атмосфера) приборами ФС Bruker (СПБГУ) и SBUV, а также данных моделирования

Прибор	Число сопоставлений	Среднее содержание, е.Д.	Изменчивость, %	Рассогласование, %	Коэффициент корреляции R
Bruker SBUV	291	243 233	23 20	3,9 ± 7,3	0,954 ± 0,005
SBUV Модель	2191	229 233	18 19	-1,9 ± 10,6	0,847 ± 0,006
Bruker Модель	263	240 236	23 22	1,7 ± 10,0	0,90 ± 0,01

Т а б л и ц а 2

Статистические характеристики сравнений ансамблей измерений содержания озона в слое 25–60 км (нижняя атмосфера) приборами ФС Bruker (СПБГУ) и SBUV, а также данных моделирования

Прибор	Число сопоставлений	Среднее содержание, е.Д.	Изменчивость, %	Рассогласование, %	Коэффициент корреляции R
Bruker SBUV	291	110 108	14 10	2,1 ± 7,0	0,89 ± 0,01
SBUV Модель	2191	104 101	12 18	2,3 ± 8,6	0,911 ± 0,004
Bruker Модель	263	109 106	14 15	2,4 ± 7,7	0,86 ± 0,02

В среднем очень хорошо согласуются спутниковые измерения (SBUV) и результаты моделирования. Модель завышает спутниковые измерения на 2% (4 е.Д.), стандартное отклонение (10,6%) не намного больше, чем стандартное отклонение (7,3%) при сопоставлении двух типов измерений. Примерно также согласуются между собой результаты наземных измерений и моделирования, только коэффициент корреляции между ними несколько больше (0,90 против 0,85).

В табл. 2 приведены аналогичные характеристики сопоставления различных ансамблей, но для слоя 25–60 км. Анализ данных табл. 2 позволяет сделать примерно такие же выводы, как и анализ табл. 1. Можно отметить, что ФС Bruker демонстрирует несколько большую изменчивость озона по сравнению со спутниковыми наблюдениями, что может быть следствием меньшей точности наземных измерений содержания озона в рассматриваемом слое по сравнению со спутниковыми. Аналогично модельные содержания озона также демонстрируют большую изменчивость, чем данные прибора SBUV. Для всех сравнений систематические рассогласования малы, а стандартные отклонения примерно одинаковы. Максимальный коэффициент корреляции наблюдается при сравнениях результатов моделирования и спутниковых измерений (0,911), в других сопоставлениях он также близок к 0,9.

В работе [5] проводились сравнения наземных измерений ОСО и результатов моделирования (модель ЕМАС [21]). Было показано, что практически во всех случаях моделированные значения ОСО превышают измеренные и особенно значимо в период зимы – начала весны. Кроме того, модель предсказывает больший разброс значений ОСО, чем на-

земные измерения. Выводы этой работы в основном совпадают с выводами данных исследований.

Заключение

Проведены сопоставления спутниковых и наземных измерений содержания озона в двух атмосферных слоях (0–25 и 25–60 км) с данными численного моделирования для Санкт-Петербурга с помощью МСНСА. Модель была создана на основе химико-климатической модели Института вычислительной математики РАН и Российского государственного гидрометеорологического университета. Сопоставлялись среднедневные и среднемесячные значения содержания озона в течение 3,5 лет (июнь 2011 – декабрь 2014 гг.).

1. В целом согласие экспериментальных и модельных значений содержания озона в двух слоях хорошее или удовлетворительное. Тем не менее обнаружены систематические отличия спутниковых и наземных данных от результатов моделирования. Наиболее часто модель завышает значения озона в слое 0–25 км в осенне-зимний период. В этом же слое иногда наблюдается и обратная картина – модель занижает озон (например, летом 2013 и 2014 гг.). В слое же 25–60 км модель очень часто занижает озон в осенне-зимний период.

2. Описанные систематические отличия наглядно проявляются при сравнениях среднемесячных значений содержания озона в исследуемых слоях. Модель завышает озон по сравнению со спутниковыми измерениями в осенне-зимний период в слое 0–25 км и занижает озон в слое 25–60 км в тот же период.

3. Модель для различных сезонов иногда демонстрирует сильные и «высокочастотные» колебания озона, которые не всегда регистрируются в спутниковых измерениях.

4. Статистические характеристики проведенных сравнений демонстрируют хорошее согласие между измеренными и смоделированными значениями озона в двух слоях атмосферы. Наземные измерения немного превышают как спутниковые, так и модельные данные в обоих слоях, в то время как модельные данные в среднем несколько больше спутниковых данных в слое 0–25 км и меньше в слое 25–60 км. Статистически лучше согласованы между собой наземные и спутниковые измерения озона: наиболее высокие корреляции ($R = 0,95$) наблюдаются в слое 0–25 км, минимальные значения стандартного отклонения (7%) в слое 25–60 км. Для остальных пар сопоставлений коэффициент корреляции также близок к 0,9, а стандартное отклонение не превышает 7–11%.

5. Выводы данной работы в основном совпадают с выводами проведенных ранее исследований для ОСО [5]: другая трехмерная модель — модель ЕМАС также завышает величины ОСО в сравнении с результатами измерений, особенно в зимний период.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Экспериментальные исследования проведены на аппаратуре РЦ «Геомодель» СПбГУ. Анализ данных проведен за счет средств гранта РФФИ № 14-17-00096.

1. *Wauben W.M.F., Fortuin J.P.F., van Velthoven P.F.J., Kelder H.M.* Comparison of modeled ozone distributions with sonde and satellite observations // *J. Geophys. Res. D.* 1998. V. 103, N 3. P. 3511–3530.
2. *WMO.* Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project Rep. N 47. Geneva: WMO, 2003. 498 p.
3. *WMO.* Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project Rep. N 50. Geneva: WMO, 2007. 502 p.
4. *Egorova T., Rozanov E., Zubov V., Manzini E., Schmutz W., Peter T.* Chemistry-climate model SOCOL: A validation of the present-day climatology // *Atmos. Chem. Phys.* 2005. V. 5, N 6. P. 1557–1576.
5. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Ионов Д.В., Курнер О., Поберовский А.В., Имхасин Х.* Сопоставление наземных измерений общего содержания O_3 , HNO_3 , HCl и NO_2 с данными численного моделирования // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2015. Т. 52, № 1. С. 64–73.
6. *Pendlebury D., Plummer D., Scinocca J., Sheese P., Strong K., Walker K., Degenstein D.* Comparison of the CMAM30 data set with ACE-FTS and OSIRIS: Polar regions // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, N 21. P. 12465–12485.
7. *Eyring V., Harris N.R.P., Rex M., Shepherd T.G., Fahey D.W., Amanatidis G.T., Austin J., Chipperfield M.P., Dameris M., Forster P.M. de F., Gettelman A., Graf H.F., Nagashima T., Newman P.A., Pawson S., Prather M.J., Pyle J.A., Salawitch R.J., Santer B.D., Waugh D.W.* A strategy for process-oriented validation of coupled chemistry-climate models // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2005. V. 86, N 8. P. 1117–1133.
8. *Bhartia P.K., McPeters R.D., Mateer C.L., Flynn L.E., Wellemeyer C.G.* Algorithm for the estimation of vertical profiles from the backscattered ultraviolet technique // *J. Geophys. Res. D.* 1996. V. 101, N 13. P. 18793–18806.
9. *Bhartia P.K., McPeters R.D., Flynn L.E., Taylor S., Kramarova N.A., Frith S., Fisher B., MeLand M.* Solar backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm // *Atmos. Measur. Technol.* 2013. N 6. P. 2533–2548.
10. *Bhartia P.K., McPeters R.D., Mateer C.L., Flynn L.E., Wellemeyer C.* Algorithm for the estimation of vertical ozone profiles from the backscattered ultraviolet technique // *J. Geophys. Res. D.* 1996. V. 101, N 13. P. 18793–18806.
11. *Поберовский А.В.* Наземные измерения ИК-спектров солнечного излучения с высоким спектральным разрешением // *Оптика атмосфер. и океана.* 2010. Т. 23, № 1. С. 56–58; *Поберовский А.В.* High-resolution ground measurements of the IR spectra of solar radiation // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 2. P. 161–164.
12. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Еременко М., Дюфор Г.* Определение содержания озона в различных слоях атмосферы с помощью наземной Фурье-спектроскопии // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2015. Т. 51, № 2. С. 191–200.
13. *Virolainen Ya.A., Timofeyev Yu.M., Poberovsky A.V.* Intercomparison of satellite and ground-based ozone total column measurements // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2013. V. 49, N 9. P. 993–1001.
14. *Virolainen Y., Timofeyev Y., Polyakov A., Ionov D., Poberovsky A.* Intercomparison of satellite and ground-based measurements of ozone, NO_2 , HF, and HCl near Saint Petersburg, Russia // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5677–5697.
15. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2007. Т. 43, № 4. С. 437–452.
16. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Зименко П.А., Кудрявцев А.П.* Моделирование влияния изменений спектральных потоков солнечной радиации, вызванных солнечной активностью, на содержание атмосферного озона // *Метеорол. и гидрол.* 2005. № 8. С. 25–37.
17. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Атласкин Е.М., Блакитная П.А.* Моделирование непрямого влияния одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на газовый состав атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2010. Т. 46, № 5. С. 672–684.
18. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2010. Т. 46, № 4. С. 487–504.
19. *Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.-K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., da Silva A.* MERRA: NASA's Modern-Era retrospective analysis for research and applications // *J. Climate.* 2011. V. 24, N 14. P. 3624–3648.
20. *WMO.* Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project Rep. N 50. Geneva: WMO, 2011. 516 p.
21. *Jöckel P., Tost H., Pozzer B.C., Buchholz J., Ganzeveld L., Hoor P., Kerkweg A., Lawrence M.G., Sander R., Steil B., Stiller G., Tanarhte M., Taraborrelli D., van Aardenne J., Lelieveld J.* The atmospheric chemistry general circulation model ECHAM5/MESSTy1: Consistent simulation of ozone from the surface to the mesosphere // *Atm. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 12. P. 5067–5104.

Yu.M. Timofeyev, Ya.A. Virolainen, S.P. Smyshlyayev, M.A. Motsakov. **Ozone over St. Petersburg: Experimental data and numerical modeling.**

The comparison of results of ozone fields numerical modeling with various experimental data allows assessing the quality of models for using them in predicting the ozone layer development. We compare satellite (SBUV) and ground-based (IFS Bruker 125HR) measurements of ozone in two atmospheric layers (0–25 and 25–60 km) with numerical simulation data (Lower and Middle Atmosphere Model) over St. Petersburg for the period between 2011 and 2014. We analyze the differences between coincident data pairs for daily and monthly averaged values. In general, model describes the experimental ozone with good or satisfactory accuracy. However, we observed some systematic differences between measured and modeled ozone contents for some periods. Usually, model overestimates the ozone columns compared to satellite measurements in 0–25 km layer and underestimates them in 25–60 km layer for the autumn–winter period. The same features we observed for daily and monthly averages. In some cases, model describes high frequency fluctuations of ozone columns, which are not observed in experimental data.