

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОЗОнового СЛОЯ ВБЛИЗИ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА  
ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ SBUV  
И МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ (2000–2014 гг.)

© 2017 г. Я. А. Виролайнен<sup>1</sup>\*, Ю. М. Тимофеев<sup>1</sup>, С. П. Смышляев<sup>2</sup>,  
М. А. Моцаков<sup>2</sup>, О. Кирнер<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Технологический институт Карлсруэ, Эггенштайн-Леопольдсхафен, Германия

\*E-mail: yana.virolainen@spbu.ru

Поступила в редакцию 20.06.2016 г.

Сопоставления результатов моделирования полей содержания озона с данными различных измерений позволяют оценить качество моделей для дальнейшего их использования в достоверных прогнозах изменения озонового слоя. Мы проанализировали временные ряды спутниковых измерений (SBUV) общего содержания озона (ОСО) и содержания озона в двух атмосферных слоях (0–25 и 25–60 км) в районе г. Санкт-Петербурга за 2000–2014 гг. и сопоставили их с результатами численного моделирования с помощью химико-транспортной модели состава нижней и средней атмосферы (ХТМ) и химико-климатической модели ЕМАС. Сравнивались дневные и среднемесячные значения содержания озона, кратковременные периоды его уменьшения, а также долговременные тренды. Статистические характеристики трех временных рядов (средние, СКО, вариации, медианы, показатели асимметрии и т.д.) хорошо согласованы. Модель ЕМАС занижает содержание озона во всех трех слоях. Рассогласования между спутниковыми данными и моделью ЕМАС составляют  $(5 \pm 5)$ ,  $(7 \pm 7)$  и  $(1 \pm 4)\%$  для ОСО слоев 0–25 и 25–60 км соответственно. Соответствующие рассогласования между SBUV и ХТМ составляют  $(0 \pm 7)$ ,  $(1 \pm 9)$  и  $(-2 \pm 8)\%$ . Обе модели хорошо описывают резкое снижение содержания озона, но модель ЕМАС делает это с заметно более высокой точностью по сравнению с моделью ХТМ, которая часто завышает наблюдающиеся минимумы в содержании озона. Оценки линейных долговременных трендов озона показывают, что для исследуемого периода они близки к нулевым как по экспериментальным, так и по модельным данным.

**Ключевые слова:** атмосферный озон, численные модели атмосферы, спутниковые измерения

**DOI:** 10.7868/S0205961417030071

ВВЕДЕНИЕ

Сравнения результатов моделирования пространственно-временных вариаций содержания озона с данными различных измерений позволяют оценить качество модели и провести при необходимости ее уточнения, что дает возможности использовать модели для достоверных прогнозов вариаций содержания озона при различных сценариях антропогенных и естественных воздействий на озоносферу. Прогнозы существенного снижения общего содержания озона (ОСО) особенно важны вблизи мегаполисов в связи с повышением УФ-освещенности поверхности при появлении озоновых “мини-дыр”. Сопоставления результатов моделирования с измерениями ОСО проводились неоднократно (Wiel et al., 1998; WMO, 2003, 2007; Egorova et al., 2005; Eyring et al., 2005, 2006; Виролайнен и др., 2016; Pendlebury et al., 2015).

Однако рассмотрение только данных измерений ОСО не позволяет выделить все высотные особенности изменчивости содержания озона, а также объективно идентифицировать фотохимические и динамические факторы, определяющие наблюдаемую сезонную и межгодовую изменчивости. Более информативными являются сопоставления по отдельным слоям атмосферы, так как на разных высотах превалируют разные процессы формирования и трансформации озона (Смышляев и др., 2017). Отметим, что валидация различных моделей осуществляется регулярно с помощью различных наземных и спутниковых измерений. Созданы специальные сайты для ее проведения (например, (<http://gmes-atmosphere.eu/d/services/gac/verif/grg/gaw>) и (Eyring et al., 2016)).

Как правило, при этом сопоставляются климатологические (среднемесячные) характеристики различных важных параметров атмосферы: тем-

пература, поле ветра, влажность, содержание озона и т.д. для разных периодов анализа. При этом часто сравнения осуществляются для различных широтных зон и с помощью определенных характеристик (например, систематических и случайных отклонений). В работе сопоставляются спутниковые измерения содержания озона в двух атмосферных слоях 0–25 и 25–60 км с данными расчетов по двум различным моделям. Измерения и расчеты относятся к Санкт-Петербургу в период 2000–2014 гг. Сравнения проведены как для среднесуточных, так и для среднемесячных значений содержания озона, что актуально для климатологических исследований. Проведено также сопоставление трендов в содержании озона.

### ИЗМЕРЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА

ОСО определяется различными спутниковыми методами, например, основанными на измерениях теплового излучения в полосе озона 9.6 мкм (Успенский и др., 1998; Поляков и др., 2010). В работе (Виролайнен и др., 2013) данные по ОСО спутникового прибора OMI, измеряющего спектры уходящего (отраженного и рассеянного) излучения в области 270–500 нм, сопоставляются с измерениями ОСО рядом наземных приборов.

В настоящей работе используются спутниковые измерения прибором Solar Backscatter Ultraviolet Instrument (SBUV), которые позволяют определять не только ОСО, но и содержание озона в различных высотных слоях. Приборы SBUV осуществляют надирные измерения спектров отраженной и рассеянной солнечной радиации в области 250–340 нм при горизонтальном разрешении примерно  $200 \times 200$  км. Описания прибора, алгоритмов интерпретации и анализ погрешностей измерений можно найти в работе (Bhartia et al., 2013). Точность спутниковых измерений содержания озона в толстых слоях атмосферы составляет 5–15%.

Для изучения высотных и временных особенностей изменчивости содержания озона вблизи Санкт-Петербурга использовались следующие две модели:

– химико-транспортная модель состава нижней и средней атмосферы (ХТМ), учитывающая изменчивость 74 малых газов атмосферы, взаимодействующих в 174 химических реакциях и 46 реакциях фотодиссоциации, и охватывающая высотный диапазон от 0 до 60 км с горизонтальным разрешением  $300 \times 400$  км (Галин и др., 2007);

– химико-климатическая модель ЕМАС (ECHAM/MESSy Atmospheric Chemistry model), моделирующая химические и динамические процессы в атмосфере от 0 до 80 км с горизонтальным разрешением  $300 \times 300$  км (Jöckel et al., 2006).

В отличие от модели ЕМАС, в модели ХТМ использовались данные ре-анализа MERRA (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications) (Rienecker et al., 2011). Подробное описание моделей и различные результаты их использования приведены в работах (Виролайнен и др., 2016; Смышляев и др., 2005, 2010а, 2010б; 2017). В данной работе сравнения осуществлены для периода с января 2000 г. по июнь 2014 г. включительно.

### СРАВНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИЗМЕРЕНИЙ

#### *Общая характеристика сопоставлений*

В табл. 1 приведены статистические характеристики трех рассматриваемых ансамблей данных (измерений SBUV, моделей ЕМАС и ХТМ для ОСО и содержания озона для двух слоев, 0–25 и 25–60 км), такие, как: среднее распределение и его среднеквадратичное отклонение (СКО); коэффициент вариации, определяющий рассеивание величины; медиана распределения, делящая распределение пополам; показатель асимметрии, характеризующий отклонение в распределении величины в ту или иную сторону; показатель эксцесса, определяющий остроту пика распределения. Жирным шрифтом выделены параметры моделей, наиболее согласованные со спутниковыми измерениями.

Прежде всего отметим, что обе модели (ЕМАС и ХТМ) хорошо воспроизводят основные статистические характеристики временных рядов содержания озона, полученные по спутниковым данным. Для ОСО (0–60 км) ХТМ абсолютно точно прогнозирует среднее значение содержания озона, несколько завышает СКО, очень точно воспроизводит медиану распределения и показатель асимметрии. Показатель эксцесса для этой модели, однако, заметно отличается от данных SBUV. Большая часть параметров распределения ОСО для модели ХТМ лучше согласуется с параметрами спутниковых измерений по сравнению с моделью ЕМАС. Для слоя 0–25 км большая часть статистических параметров для модели ХТМ также лучше согласуется с данными измерений. С другой стороны, модель ЕМАС для этого слоя несколько занижает средние значения и медиану содержания озона и завышает СКО, коэффициенты вариации, показатель асимметрии и показатель эксцесса (как и для ОСО). Для слоя 25–60 км можно отметить, что модель ЕМАС лучше прогнозирует средние значения, СКО, показатели асимметрии и эксцесса, а модель ХТМ – коэффициент вариации и медиану. Таким образом, для слоя 25–60 км параметры распределения модели ЕМАС в среднем лучше, чем у модели

**Таблица 1.** Статистические характеристики рассматриваемых ансамблей

| Слой, км                | 0–60 |           |             | 0–25 |      |             | 25–60 |              |            |
|-------------------------|------|-----------|-------------|------|------|-------------|-------|--------------|------------|
|                         | SBUV | EMAC      | XTM         | SBUV | EMAC | XTM         | SBUV  | EMAC         | XTM        |
| Параметр                |      |           |             |      |      |             |       |              |            |
| Среднее, е. Д.          | 333  | 317       | <b>333</b>  | 230  | 215  | <b>228</b>  | 103   | <b>102</b>   | 105        |
| СКО, е. Д.              | 48   | <b>50</b> | 51          | 42   | 45   | <b>42</b>   | 13    | 12           | 14         |
| Коэффициент вариации, % | 14   | 16        | <b>15</b>   | 18   | 21   | <b>18</b>   | 13    | 12           | <b>13</b>  |
| Медиана, е. Д.          | 326  | 310       | <b>325</b>  | 224  | 207  | <b>220</b>  | 106   | 105          | <b>106</b> |
| Показатель асимметрии   | 0.55 | 0.70      | <b>0.56</b> | 0.73 | 0.84 | <b>0.71</b> | –0.57 | <b>–0.44</b> | –0.02      |
| Показатель эксцесса     | 0.00 | 0.32      | –0.27       | 0.30 | 0.52 | –0.04       | –0.39 | <b>–0.38</b> | –0.45      |

**Таблица 2.** Статистические характеристики сопоставления различных ансамблей, КК (здесь и далее) – коэффициент корреляции

| Слой, км  | 0–60            |       | 0–25          |                 | 25–60 |               |                 |        |               |
|-----------|-----------------|-------|---------------|-----------------|-------|---------------|-----------------|--------|---------------|
|           | рассогласование |       | КК            | рассогласование |       | КК            | рассогласование |        |               |
|           | е. Д.           | %     |               | е. Д.           | %     |               | е. Д.           | %      |               |
| Ансамбли  |                 |       |               |                 |       |               |                 |        |               |
| SBUV-EMAC | 16 ± 16         | 5 ± 5 | 0.946 ± 0.001 | 15 ± 15         | 7 ± 7 | 0.938 ± 0.002 | 1 ± 4           | 1 ± 4  | 0.959 ± 0.001 |
| SBUV-XTM  | 0 ± 23          | 0 ± 7 | 0.893 ± 0.003 | 2 ± 20          | 1 ± 9 | 0.883 ± 0.003 | –2 ± 8          | –2 ± 8 | 0.820 ± 0.005 |

XTM, согласуются с параметрами распределения содержания озона по спутниковым данным.

В табл. 2 приведены численные характеристики абсолютных и относительных отличий двух моделей (средние и СКО) от данных спутниковых измерений, а также коэффициенты корреляции (КК) между различными ансамблями. Для ОСО (0–60 км) модель EMAC занижает озон на 5%, случайная компонента отличия составляет также 5%. Для модели XTM систематические отличия отсутствуют, СКО составляют 7%. КК максимален для сопоставлений EMAC и SBUV. Для слоя 0–25 км модель EMAC также занижает в среднем значения озона по сравнению со спутниковыми измерениями (на 7%), а случайная компонента рассогласований между ними относительно мала (7%). Такие же сравнения с данными модели XTM показывают очень малые систематические отличия (1.0%), но большую случайную компоненту рассогласований – 9%. КК максимальны при сравнении временных рядов спутниковых измерений и модели EMAC. Для слоя 25–60 км отличия моделей от экспериментальных данных малы как по абсолютным, так и по относительным значениям. Так, модель EMAC отличается от спутниковых данных на 1%, случайные отличия составляют 4%. Несколько большие величины отличий наблюдаются для XTM – 2 и 8% соответственно. КК максимален при сравнениях модели EMAC с экспериментальными данными. В целом можно отметить, что модель EMAC для этого слоя лучше согласуется со спутниковыми измерениями.

Пример сопоставления функций распределения содержания озона приведен на рис. 1 для ОСО и для содержания озона в слое 25–60 км. Распределение реализаций содержания озона для всех трех ансамблей и слоев хорошо согласованы друг с другом. Можно только отметить, что модель EMAC дает для ОСО и слоя 0–25 км несколько большее число реализаций с малым содержанием озона по сравнению со спутниковыми данными и XTM. Такая особенность модели (некоторое занижение озона) была отмечена и ранее.

Пример анализа сезонных вариаций содержания озона по данным моделирования и измерений приведен на рис. 2 (для ОСО) и рис. 3 (для слоя 25–60 км), где представлены среднемесячные значения содержания озона, рассчитанные по данным трех ансамблей, а также разность между экспериментальными и модельными данными. Обе модели с высокой точностью описывают сезонные изменения ОСО. Но модель EMAC в среднем дает более низкие значения ОСО по сравнению со спутниковыми измерениями (до 20–40 е. Д.). При моделировании ОСО с помощью XTM отличия, как правило, не превышают 20–30 е. Д. Отметим, что аналогичная картина наблюдается и для слоя 0–25 км, в котором сосредоточена основная масса атмосферного озона.

В слое 25–60 км модель XTM в среднем завышает содержание озона (в максимумах – до 10–15 е. Д.) по сравнению с измерениями (рис. 3). При этом модель EMAC очень хорошо отражает измеряемый спутником SBUV сезонный ход ва-

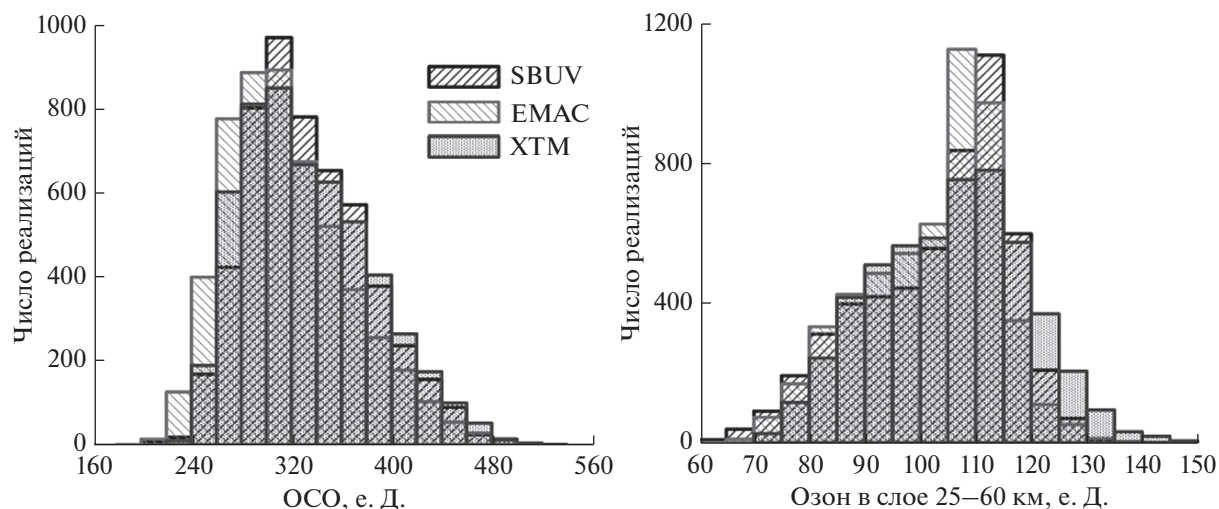


Рис. 1. Гистограммы распределения реализаций ОСО и содержания озона в слое 25–60 км.

риаций озона в слое, разность двух ансамблей не превышает 5 е. Д.

#### Кратковременное уменьшение озонового слоя

Важное значение для прогнозов увеличения УФ-освещенности поверхности имеет воспроизводимость моделями быстрых и значительных уменьшений содержания озона. Анализ экспериментальных данных SBUV выделил за рассматриваемые 15 лет 131 случай быстрого и кратковре-

менного падения ОСО на 10% и более вблизи Санкт-Петербурга в течение суток.

На рис. 4 приведен пример таких изменений в феврале–мае 2011 г. для ОСО. Резкие уменьшения ОСО наблюдались в начале марта и в конце марта–начале апреля. Эти изменения по данным спутниковых измерений составляли ~100–120 е. Д. Отметим, что подобное сокращение озонового слоя при определенных условиях может приводить к ~30% увеличению УФ-поточков на поверх-

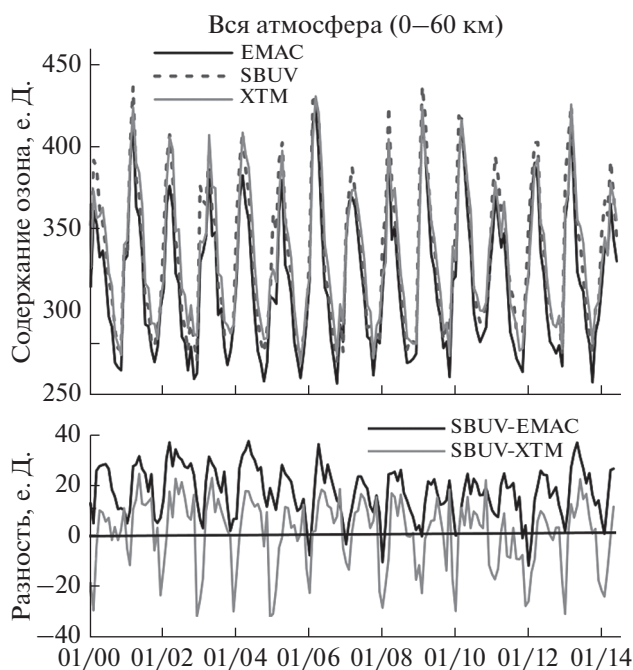


Рис. 2. Сезонный ход среднемесячных значений содержания ОСО для разных ансамблей, а также их разность.

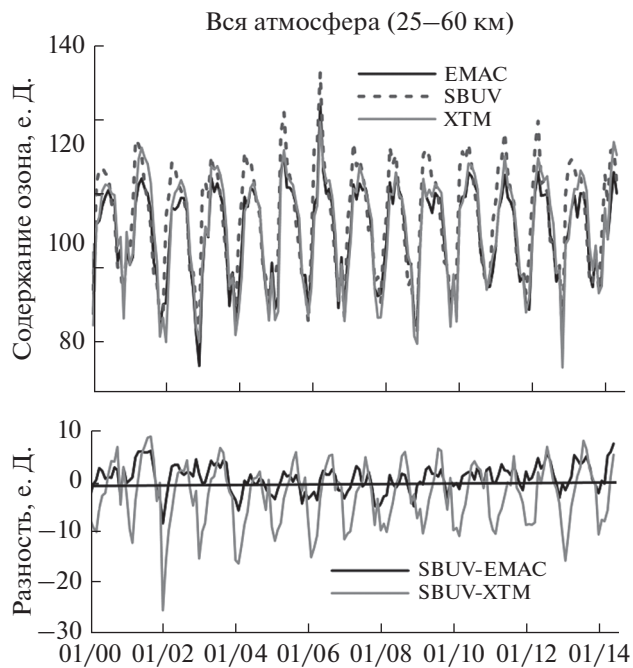


Рис. 3. То же, что и рис. 2, но для слоя 25–60 км.

ности Земли. В конце февраля—начале марта падение озона наиболее точно воспроизводит модель ЕМАС, в конце марта—начале апреля обе модели примерно одинаково точно воспроизводят изменения ОСО, но ЕМАС делает это точнее.

В табл. 3 представлены статистические характеристики рассогласования экспериментальных (SBUV) и модельных данных в дни 10%-ного уменьшения ОСО по сравнению с предыдущими днями. Модель ЕМАС немного занижает минимумы ОСО (на 2%), в то время как модель ХТМ завышает (на 7%). Случайная компонента рассогласований между экспериментальными и модельными данными составляет 6 и 7%, для модели ЕМАС и ХТМ соответственно. КК для обеих моделей превышают 0.9. При сопоставлении этих данных с данными табл. 2, относящимися ко всем дням измерений, видно, что точность описания измерений моделью ЕМАС слабо зависит от интенсивности вариаций ОСО, т.е. модель ЕМАС качественно реагирует на резкое уменьшение озона, но при этом количественно несколько недооценивает его глубину. В то же время, при сопоставлении данных SBUV и модели ХТМ (табл. 3), наблюдается значительный рост систематических рассогласований, т.е. в дни уменьшения содержания озона данные модели ХТМ, как правило, значительно завышают содержание озона. Таким образом, модель ХТМ не отражает быстрое и резкое уменьшение ОСО.

На рис. 5 показаны разности между данными измерений SBUV и смоделированными значениями ОСО для двух моделей. Этот рисунок отражает представленные в табл. 3 данные. Так, в большинстве случаев разность между измерениями и моделью ХТМ отрицательна, т.е. модель ХТМ завышает значения озона в его минимумах. Модель ЕМАС в среднем незначительно занижает минимумы в содержании озона, что в целом характерно для результатов сопоставления данных модели ЕМАС и спутниковых измерений SBUV.

*Долговременные тренды содержания озона*

Относительно длительный период анализа (около 15 лет) позволяет оценить величины долговременных трендов содержания озона. Такие оценки были проведены нами с помощью простой модели линейного тренда для ОСО и содержаний озона в слоях 0–25 и 25–60 км для всех трех временных рядов (табл. 4).

Прежде всего, отметим, что полученные тренды близки к нулевым для всех рассмотренных случаев и часто меньше погрешностей их расчета. Жирным шрифтом выделены статистически значимые значения приведенных величин трендов. По спутниковым данным SBUV наблюдается незначительный отрицательный тренд в слое 0–

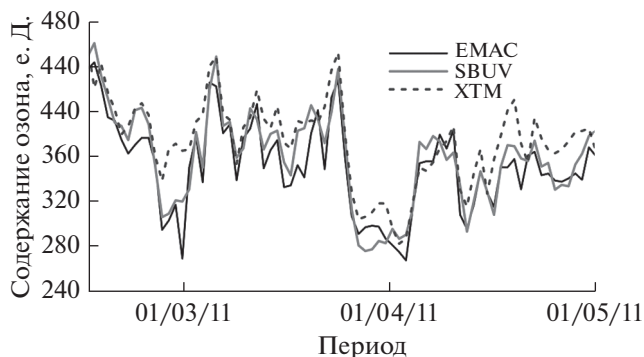


Рис. 4. Изменчивость ОСО весной 2011 г. по данным разных ансамблей.

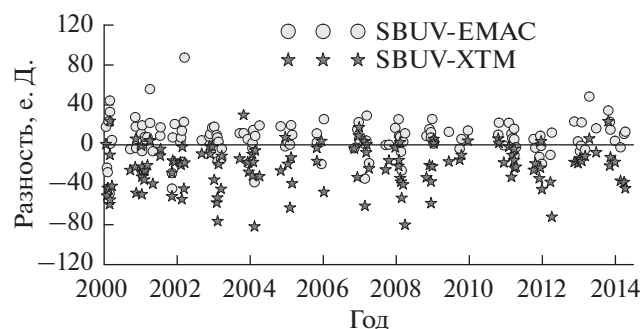


Рис. 5. Разность между измеренными и смоделированными значениями ОСО в дни его 10%-го уменьшения.

25 км (немногим более 1% за декаду). Для слоя 25–60 км все три временные ряда дают небольшой положительный тренд, не превышающий 1.3% за декаду (по спутниковым данным). С учетом величин погрешностей расчетов трендов можно сказать, что в целом и измерения и моделирования указывают на очень малые тренды в содержании озона в районе Санкт-Петербурга в период 2000–2014 гг.

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

Проведены сопоставления спутниковых измерений SBUV ОСО и содержания озона в двух атмосферных слоях (0–25 и 25–60 км) с данными численного моделирования для Санкт-Петербурга с помощью химико-транспортной модели

**Таблица 3.** Статистические характеристики сопоставления различных ансамблей для 131 дня наблюдаемого быстрого уменьшения ОСО на 10%

| Ансамбли  | Рассогласование |        | КК          |
|-----------|-----------------|--------|-------------|
|           | е. Д.           | %      |             |
| SBUV-ЕМАС | 6 ± 18          | 2 ± 6  | 0.93 ± 0.01 |
| SBUV-ХТМ  | -22 ± 22        | -7 ± 7 | 0.92 ± 0.01 |

**Таблица 4.** Количественные характеристики трендов (линейная регрессия) среднедневных значений содержания озона в слоях – в е. Д. в год и в % в декаду, – а также неопределенность трендов на 95%-ном доверительном интервале

| Слой, км | 0–25             |                  | 25–60              |                  | 0–60             |                |
|----------|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|
|          | е. Д./год        | %/декада         | е. Д./год          | %/декада         | е. Д./год        | %/декада       |
| ансамбли |                  |                  |                    |                  |                  |                |
| SBUV     | $-0.28 \pm 0.27$ | $-1.24 \pm 1.17$ | $+0.13 \pm 0.08$   | $+1.3 \pm 0.8$   | $-0.15 \pm 0.31$ | $-0.4 \pm 0.9$ |
| EMAC     | $+0.19 \pm 0.29$ | $+0.9 \pm 1.3$   | $+0.075 \pm 0.002$ | $+0.74 \pm 0.02$ | $+0.27 \pm 0.32$ | $+0.9 \pm 1.0$ |
| XTM      | $+0.12 \pm 0.27$ | $+0.5 \pm 1.2$   | $+0.10 \pm 0.09$   | $+0.9 \pm 0.8$   | $+0.22 \pm 0.32$ | $+0.7 \pm 1.0$ |

XTM и химико-климатической модели EMAC. Сравнивались дневные и среднемесячные значения содержания озона, кратковременное уменьшение ОСО (“минидыры”) и долговременные тренды в течение 2000–2014 гг. Эти исследования позволяют сделать следующие основные выводы:

1) Для условий Санкт-Петербурга наблюдается хорошее согласие результатов расчетов двух моделей со спутниковыми измерениями SBUV. Различные статистические характеристики трех временных рядов (средние, СКО-вариации, медианы, показатели асимметрии и т.д.) хорошо согласованы. Статистические характеристики временного распределения ОСО и озона в слое 0–25 км по модели XTM в среднем лучше согласуются со спутниковыми характеристиками по сравнению с моделью EMAC. Это связано с использованием в модели XTM полей ветра, температуры, влажности и давления по данным ре-анализа MERRA. Для слоя 25–60 км наблюдается обратная картина – характеристики модели EMAC в среднем лучше согласуются со спутниковыми данными;

2) Для ОСО модель EMAC занижает содержание озона по сравнению со спутниковыми данными в среднем на 16 е. Д. (5%), случайная компонента отличий достигает 16 е. Д. (5%). Для модели XTM систематические отличия практически отсутствуют, СКО составляют 23 е. Д. (7%). Для слоя 0–25 км модель EMAC также занижает в среднем значения озона по сравнению со спутниковыми измерениями (на 15 е. Д. – 7%), а случайная компонента рассогласований между ними относительно мала (15 е. Д. – 7%). Такие же сравнения с данными модели XTM показывают очень малые систематические отличия (2 е. Д. – 1%), но большую случайную компоненту рассогласований (20 е. Д. – 9%). Для слоя 25–60 км отличия моделей от экспериментальных данных также невелики. Модель EMAC отличается от спутниковых данных на 1%, случайные отличия составляют 4%. Несколько большие величины отличий наблюдаются для XTM: –2 и 8% соответственно. КК максимальны для сопоставлений результатов SBUV и EMAC, но достаточно высоки и при сравнениях с моделью XTM;

3) Примеры сопоставлений функций распределения (гистограмм) содержания озона для спутниковых и модельных данных демонстрируют их подобие. Можно только отметить, что модель EMAC дает для ОСО и слоя 0–25 км несколько большее число реализаций с малым содержанием озона по сравнению со спутниковыми данными и с XTM;

4) Сравнения сезонного хода в различных данных по озону демонстрирует высокое качество описания моделями межгодовых вариаций, проявляющихся в вариациях минимумов и максимумов среднемесячных значений. Но модель EMAC в среднем дает более низкие значения среднемесячных ОСО по сравнению со спутниковыми измерениями (до 20–40 е. Д.). При моделировании XTM отличия с экспериментом, как правило, не превышают 20–30 е. Д.;

5) Обе модели хорошо описывают резкие снижения содержания озона, но модель EMAC делает это с заметно более высокой точностью по сравнению с моделью XTM. Модель XTM часто завышает наблюдающиеся минимумы в содержание озона;

6) Простейшие оценки линейных долговременных трендов озона показывают, что для периода 2000–2014 гг. они близки к нулевым как по экспериментальным, так и модельным данным.

Отметим, что многочисленные сравнения результатов моделирования с помощью EMAC содержатся в статьях (Righi et al., 2015; Jöckel et al., 2016). Валидация результатов моделирования содержания озона показала, что модель хорошо согласуется с измерениями.

Отмечается качественное воспроизведение зональных средних содержания озона, в частности, высоких содержаний озона весной в северном полушарии. Но тропосферные значения озона переоцениваются моделью примерно на 20%. В стратосфере отличия меньше, модель недооценивает измерения в среднем на 5%. Только в летнее время (июнь–сентябрь) отличия достигают 20%. Наши сопоставления модели EMAC со спутниковыми измерениями SBUV в районе Санкт-Петербурга показали в среднем существенно меньшие отличия.



Наконец, наши оценки долговременных трендов хорошо согласуются с оценками работы (Nargis et al., 2015). За близкий временной период (1998–2012 гг.) оценки трендов по данным различной экспериментальной информации (наземной и спутниковой) для широтного пояса 35°–60° с.ш. близки к нулевым.

Сбор и обработка данных проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 14-17-00096. Сопоставления с моделью ЕМАС профинансированы грантом СПбГУ № 11.42.1057.2016. Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В. Сравнение спутниковых и наземных измерений общего содержания озона // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 4. С. 83–91.
- Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Ионов Д.В., Кирнер 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. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 64–73.
- Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М. Совместная химико-климатическая модель атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 4. С. 437–452.
- Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Успенский А.Б. Возможности определения содержания озона и малых газовых составляющих по данным спутниковых ИК-зондировщиков высокого спектрального разрешения (ИКФС-2) // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 3. С. 3–11.
- 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. Физика атмосферы и океана. 2010а. Т. 46. № 5. С. 672–684.
- 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.
- Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я. Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010б. Т. 46. № 4. С. 487–504.
- Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Моцаков М.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Поляков А.В. Межгодовая и сезонная изменчивость содержания озона вблизи Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. (в печати).
- Успенский А.Б., Троценко А.Н., Рублев А.Н., Романов С.В. Определение общего содержания малых газовых составляющих атмосферы с помощью ИК-зондировщика IASI. II. Анализ точности результатов зондирования // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 79–86.
- Bhartia P.K., McPeters R.D., Flynn L.E., Taylor S., Kramarova N.A., Frith S., Fisher B., DeLand M. Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6. P. 2533–2548.
- 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. P. 1557–1576.
- Eyring V., Harris N.R.P., Rex M., Shepherd T.G., Fahey D.W., Amanatidis G.T., Austin J., Chipperfield M.P., Dameris M., De F. Forster P.M., 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. Met. Soc. 2005. V. 86. № 8. P. 1117–1133.
- Eyring V., Butchart N., Waugh D.W., Akiyoshi H., Austin J., Bekki S., Bodeker G.E., Boville B.A., Bruehl C., Chipperfield M.P., Cordero E., Dameris M., Deushi M., Fioletov V.E., Frith S.M., Garcia R.R., Gettelman A., Giorgetta M.A., Grewe V., Jourdain L., Kinnison D.E., Mancini E., Manzini E., Marchand M., Marsh D.R., Nagashima T., Newman P.A., Nielsen J.E., Pawson S., Pitari G., Plummer D.A., Rozanov E., Schraner M., Shepherd T.G., Shibata K., Stolarski R.S., Struthers H., Tian W., Yoshiki M. Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry climate model simulations of the recent past // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D2230.
- Eyring V., Righi M., Lauer A., Evaldsson M., Wenzel S., Jones C., Anav A., Andrews O., Cionni I., Davin E.L., Deser C., Ehbrecht C., Friedlingstein P., Gleckler P., Gottschaldt K.-D., Hagemann S., Jukes M., Kindermann S., Krasting J., Kurnert D., Levine R., Loew A., Mäkelä J., Martin G., Mason E., Phillips A.S., Read S., Rio C., Roehrig R., Senfleben D., Sterl A., van Ulft L.H., Walton J., Wang S., Williams K.D. ESMValTool (v1.0) – a community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth System Models in CMIP // Geosci. Model Dev. 2016. V. 8. P. 1747–1802.
- Harris N.R.P., Hassler B., Tummon F., Bodeker G.E., Hubert D., Petropavlovskikh I., Steinbrecht W., Anderson J., Bhartia P.K., Boone C.D., Bourassa A., Davis S.M., Degenstein D., Delcloo A., Frith S.M., Froidevaux L., Godin-Beekmann S., Jones N., Kurylo M.J., Kyrölä E., Laine M., Leblanc S.T., Lambert J.-C., Liley B., Mahieu E., Maycock A., de Mazière M., Parrish A., Querel R., Rosenof K.H., Roth C., Sioris C., Staehelin J., Stolarski R.S., Stübi R., Tamminen J., Vigouroux C., Walker K.A., Wang H.J., Wild J., Zawodny J.M. Past changes in the vertical distribution of ozone – Pt 3: Analysis and interpretation of trends // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 9965–9982.
- Jöckel P., Tost H., Pozzer A., Brühl 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/MESSy1: consistent simulation of ozone from the surface to the mesosphere // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6. P. 5067–5104.
- Jöckel P., Tost H., Pozzer A., Kunze M., Kirner O., Brenninkmeijer C.A.M., Brinkop S., Cai D.S., Dyroff C., Eckstein J., Frank F., Garny H., Gottschaldt K.-D., Graf P., Grewe V., Kerkweg A., Kern B., Matthes S., Mertens M., Meul S., Neu-maier M., Nützel M., Oberländer-Hayn S., Ruhnke R., Runde T., Sander R., Scharffe D., Zahn A. Earth System

Chemistry integrated Modelling (ESCiMo) with the Modular Earth Submodel System (MESSy) V. 2.51 // *Geosci. Model Dev.* 2016. V. 9. P. 1153–1200.

*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 // *Atm. Chem. Phys.* 2015. V. 15. P. 12465–12485.

*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., Gu W., Joiner J., Koster R.D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C.R., Reichle R., Robertson F.R., Ruddick A.G., Sienkiewicz M., Woollen J.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *J. Clim.* 2011. V. 24. P. 3624–3648.

*Righi M., Eyring V., Gottschaldt K.-D., Klinger C., Frank F., Jöckel P., Cionni I.* Quantitative evaluation of ozone and selected climate parameters in a set of EMAC simulations // *Geosci. Model Dev.* 2015. V. 8. P. 733–768.

*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.* 1998. V. 103. № D3. PP. 3511–3530.

WMO. Scientific assessment of ozone depletion: Global Ozone Research and Monitoring Project. Rep. 47. Geneva: WMO, 2003. 498 p.

WMO. Scientific assessment of ozone depletion: Global Ozone Research and Monitoring Project. Rep. 50. Geneva: WMO, 2007.

## The Study of the Ozone Layer Variability near St. Petersburg between 2000 and 2014 Based on SBUV Satellite Measurements and the Results of Numerical Modeling

Y. A. Virolainen<sup>a</sup>, Y. M. Timofeyev<sup>a</sup>, S. P. Smyshlyaev<sup>b</sup>, M. A. Motsakov<sup>b</sup>, O. Kirner<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>c</sup>*Karlsruhe Institute of Technology, Eggenstein-Leopoldshafen, Germany*

The comparison of the results of ozone fields numerical modeling with various experimental data allows assessing the quality of the models for further using them in predicting the ozone layer development. We have analyzed the time series of SBUV satellite measurements of the total ozone column (TOC) and the ozone partial columns in two atmospheric layers (0–25 and 25–60 km) and compared them with the results of the numerical simulation of chemistry transport model for the low and middle atmosphere (CTM) and chemistry climate model EMAC. All data sets relate to St. Petersburg and the period between 2000 and 2014. We consider the daily and monthly average values, short-term periods of ozone loss as well as long-term trends of ozone columns. The statistical characteristics (means, SD, variations, medians, asymmetry parameter, etc.) of the ozone time series are quite similar for all datasets. However, the EMAC model systematically underestimates the ozone columns in all considered layers. The differences between satellite measurements and EMAC numerical simulations total  $(5 \pm 5)\%$ ,  $(7 \pm 7)\%$  and  $(1 \pm 4)\%$  for TOC, 0–25 and 25–60 km layer, respectively. The correspondent differences between SBUV measurements and CTM simulations amount to  $(0 \pm 7)\%$ ,  $(1 \pm 9)\%$  and  $(-2 \pm 8)\%$ . The both models describe well the sudden episodes of the ozone loss, but the EMAC model does this more precise and correct compared to the CTM model, which often underestimate the depth of the ozone loss. The assessment of the linear trends for the period between 2000 and 2014 shows that they are close to zero for all considered datasets.

**Keywords:** atmospheric ozone, numerical modeling, satellite measurements