

УДК 551.510.534.3:551.506.3

МЕЖГОДОВЫЕ И СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В РАЗНЫХ ВЫСОТНЫХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2017 г. С. П. Смышляев^{а, *}, Я. А. Виролайнен^{б, **}, М. А. Моцаков^а,
Ю. М. Тимофеев^б, А. В. Поберовский^б, А. В. Поляков^б

^аРоссийский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

^бСанкт-Петербургский государственный университет
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

*E-mail: smyshl@rshu.ru

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

Поступила в редакцию 26.02.2016 г.

После доработки 20.05.2016 г.

Выполнен анализ изменчивости содержания атмосферного озона в разных высотных слоях в окрестности Санкт-Петербурга в 2009–2014 гг. на основании сопоставления результатов наземных измерений на станции Петергоф с результатами спутниковых измерений с помощью прибора SBUV и результатами численного моделирования. В модели температура, скорость ветра, влажность воздуха и приземное давление задавались по данным ре-анализа MERRA. По совокупности результатов измерений, численного моделирования и реанализа идентифицированы особенности сезонных и межгодовых изменений содержания озона в разных высотных слоях, а также оценена роль фотохимических и динамических факторов в вариациях содержания озона.

Ключевые слова: содержание озона, наземные измерения, численное моделирование, сезонная и межгодовая изменчивость

DOI: 10.7868/S0002351517030154

ВВЕДЕНИЕ

Содержание озона в разных высотных слоях атмосферы определяет интенсивность ультрафиолетовой солнечной радиации у земной поверхности и дает вклад в нагрев стратосферы и, следовательно, влияет на ее структуру и динамику [1–3]. Время жизни озона меняется от дней в верхней стратосфере до лет в нижней стратосфере и тропосфере [4, 5]. Содержание озона в столбе атмосферы над неподвижным пунктом наблюдений изменяется в результате фотохимического образования и разрушения и динамического обмена воздушными массами [1, 6–8]. Это приводит к значительным сезонным колебаниям и межгодовым вариациям содержания озона в разных высотных слоях атмосферы [5, 8].

Несмотря на сложившиеся представления об общих факторах, влияющих на сезонную изменчивость содержания озона [1, 4, 6], его колебания в разных районах могут иметь особенности, связанные с географическим положением, орографией, локальными процессами и источниками. Особый

интерес представляет изменчивость содержания озона в приполярных районах из-за их близости к полярной области, где в последние годы наблюдались аномальные колебания содержания озона и, в частности, весенние озоновые дыры [9–11]. Особенно интересны вариации содержания озона в Субарктике, так как, несмотря на то, что наиболее значительное весеннее сокращение содержания озона, получившее название озоновой дыры, происходит в Антарктике [8–10], в последние годы в Арктике достаточно регулярно стали отмечаться явления, похожие на антарктическую озоновую дыру, но меньшего масштаба [11].

Исследование изменчивости содержания озона можно проводить на основе анализа данных измерений [12] или по результатам численного моделирования [13, 14]. В последние годы основным источником данных о содержании озона стали спутниковые измерения. Несмотря на очевидные достоинства использования спутниковых данных, например их глобальный охват, локальные наземные измерения содержания озона ди-

станционными оптическими методами имеют свои преимущества при анализе длинных рядов наблюдений.

На станции Петергоф, расположенной вблизи Санкт-Петербурга, в течение достаточно длительного времени проводятся наблюдения общего содержания озона (ОСО) [12, 15, 16]. К настоящему времени накоплены ряды почти ежедневных наблюдений в течение 2009 по 2014 гг., что позволяет использовать эти данные для изучения особенностей сезонных и межгодовых вариаций содержания озона.

Рассмотрение только данных измерений ОСО не позволяет выделить все высотные особенности изменчивости озона и идентифицировать фотохимические и динамические факторы, определяющие особенности наблюдаемой сезонной и межгодовой изменчивости в разных высотных диапазонах. В настоящей работе результаты измерений ОСО сопоставляются с результатами восстановления содержания озона в разнесенных по высоте слоях по данным наземных и спутниковых измерений и результатам численного моделирования для периода 2009–2014 гг. При этом для более репрезентативной оценки влияния динамических факторов на изменение содержания озона поля температуры, ветра, влажности и поверхностного давления ассимилируются моделью из данных реанализа MERRA (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications) [17].

Таким образом, целью работы является исследование наблюдаемых особенностей сезонного и межгодового изменения содержания озона вблизи Санкт-Петербурга в течение 2009–2014 гг. на основе анализа результатов наземных измерений дистанционными оптическими методами, сравнения их со спутниковыми данными и их интерпретации на основе численного моделирования с использованием глобальной модели состава нижней и средней атмосферы, в которой динамические параметры задаются из данных реанализа MERRA.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения содержания озона проводятся на станции Петергоф (59.88° N, 29.82° E) вблизи Санкт-Петербурга. Для этого используется спектрофотометр IFS Bruker 125HR, имеющий спектральное разрешение около 0.007 см^{-1} [16]. Точность измерений ОСО составляет 1–3%. Наряду с этим определяется содержание озона в различных высотных слоях атмосферы с точностью 3–8% [12]. Однако кроме приборной точности, существуют и другие типы погрешностей, которые мо-

гут иметь значение при использовании данных наземных измерений для анализа процессов переноса между Арктикой и Субарктикой, влияющих на газовый состав атмосферы. Такие погрешности и оценивались на основе сравнения результатов измерений на станции Петергоф с результатами независимых наблюдений и результатами численного моделирования. В качестве независимых наблюдений содержания озона использовались данные спутниковых измерений с помощью прибора SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Instrument) [18], который позволяет измерять как ОСО содержание озона в разных высотных слоях с точностью 5–15% [19].

Для изучения высотных особенностей изменчивости содержания озона и определения причин наблюдаемых вариаций ОСО проводились численные эксперименты с моделью состава нижней и средней атмосферы (МНСА). Модель была создана на основе химико-климатической модели (ХКМ) Института вычислительной математики (ИВМ) РАН и Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) [20], которая ранее успешно применялась для решения задач, связанных с взаимодействием физических и химических процессов в атмосфере [21–23]. В отличие от ХКМ поля ветра, температуры, влажности и давления в МНСА не рассчитываются, а задаются по данным реанализа. В настоящем исследовании использовались данные реанализа MERRA [17].

Модель охватывает высотный диапазон 0–60 км и позволяет рассчитывать содержание 74 малых газов атмосферы, взаимодействующих в 174 химических реакциях и 46 реакциях фотодиссоциации [24, 25]. Скорости реакций фотодиссоциации рассчитывались с учетом спектральной зависимости потоков солнечной радиации [26] и их изменения в циклах солнечной активности [27]. На каждом модельном временном шаге в МНСА используются поля ветра, влажности, поверхностного давления и температуры из реанализа MERRA [17].

Для исследования влияния арктических процессов на изменения газового состава стратосферы Субарктики и, в частности, вблизи Санкт-Петербурга используется модель образования и эволюции полярных стратосферных облаков (ПСО), которые играют ключевую роль в формировании “озоновых дыр” поздней зимой – ранней весной в Антарктике и Арктике [28]. Модель позволяет рассчитывать образование ПСО в течение полярной зимы в нижней стратосфере (15–25 км), ядрами для которых служат существующие на этих высотах частицы сульфатного аэрозоля. При по-

нижении температуры воздуха ниже 200 К происходит рост объема частиц сульфатного аэрозоля за счет конденсации на нем водяного пара, а также паров азотной и серной кислот. Увеличение объема аэрозольных частиц ведет к увеличению площади их поверхности и, следовательно, к увеличению скоростей гетерогенных химических реакций, приводящему к перераспределению хлорных и бромных газовых составляющих атмосферы с последующим разрушением озона в хлорных и бромных каталитических циклах [11, 13, 28]. С другой стороны, поглощение паров азотной кислоты и водяного пара образующимися частицами ПСО приводит к денитрификации и дегидратации полярной атмосферы, в результате чего увеличивается эффективность каталитического разрушения озона [10, 29].

Модельные эксперименты выполнялись на период с 2000 по 2014 г. Изменения потоков газов с подстилающей поверхности, содержания аэрозоля, температуры поверхности океана и площади его покрытия льдом задавались на основании сценариев Всемирной метеорологической организации, используемых при оценках изменения озонового слоя Земли [5]. Начальные данные на начало 2000 г. задавались по результатам расчетов с использованием ХКМ ИВМ РАН – РГГМУ [20]. С 1 января 2000 г. каждые три часа в MCHCA ассимилировались текущие данные MERRA, которые приводились к координатной сетке модели и использовались для расчета скоростей химических реакций и сечений поглощения солнечной радиации (температура), адвективного переноса озона и других газов (ветер) и содержания водяного пара в тропосфере (абсолютная влажность). Поле вертикальной скорости рассчитывалось в модели по уравнению неразрывности на основе ассимилированных данных о горизонтальных составляющих скорости ветра. Кроме того, в модели рассчитывалось содержание водяного пара в стратосфере на основе его заданного тропосферного содержания с учетом фотохимических источников в стратосфере.

Анализу и сравнению с результатами наземных и спутниковых наблюдений подвергались среднесуточные значения содержания озона в столбе атмосферы и в отдельных высотных слоях в период 2009–2014 гг. При этом основное внимание обращалось на временные периоды, когда результаты измерений и моделирования хорошо соответствовали друг другу с точки зрения сезонной и межгодовой изменчивости, потому что для периодов, когда модельные расчеты соответствуют измерениям, можно выделить и проанализировать влияние учтенных в модели физических и

химических факторов, определяющих наблюдаемую изменчивость содержания озона. Периоды существенных расхождений между результатами измерений и моделирования выделялись для последующей проверки с точки зрения оценки погрешностей измерений и моделирования, а также определения влияющих на содержание озона процессов, которые не учитываются в модели состава нижней и средней атмосферы. Подобное исследование соответствия результатов измерений и моделирования будет осуществлено в дальнейшем и представлено в отдельной статье.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведены сглаженные значения ОСО в течение исследуемого периода по данным наземных измерений, спутниковым данным и результатам численного моделирования (верхняя панель), а также попарные разности между ними (нижняя панель). Сглаживание выполнено путем десятикратного применения фильтра с весами 0.2, 0.5, 0.25 [29]. Результаты измерений и моделирования в целом хорошо соответствуют друг другу и отражают основные особенности межгодовой и сезонной ОСО вблизи Санкт-Петербурга. Основные расхождения с данными наземных измерений приходятся на периоды частичного отсутствия измерений (конец 2009–начало 2010 гг. и конец 2010–начало 2011 гг.). Максимальные амплитуды разности как между результатами наземных и спутниковых измерений, так и между результатами моделирования и данными измерений приходятся на осенне-зимний период, когда существенную роль играет атмосферная динамика, в результате чего при сравнении важным становится пространственная локализация измерений и разрешение модели.

Каждый год максимальные значения ОСО отмечаются в конце зимы–начале весны, а минимальные значения – в конце осени. При этом уменьшение ОСО от максимума к минимуму происходит в течение семи месяцев (с марта по сентябрь), а увеличение от минимума к максимуму – в течение четырех месяцев (с ноября по февраль). На фоне повторяющихся из года в год периодических изменений ОСО можно отметить короткопериодные изменения, выражающиеся в кратковременных, в течение одного-двух месяцев, увеличений или уменьшений ОСО до 10% относительно среднего значения. Наиболее значительные эпизоды увеличения ОСО, достигающего 100 е.Д., наблюдаются зимой, когда значения ОСО и без того близки к годовому максимуму. При этом в периоды наиболее резких изменений

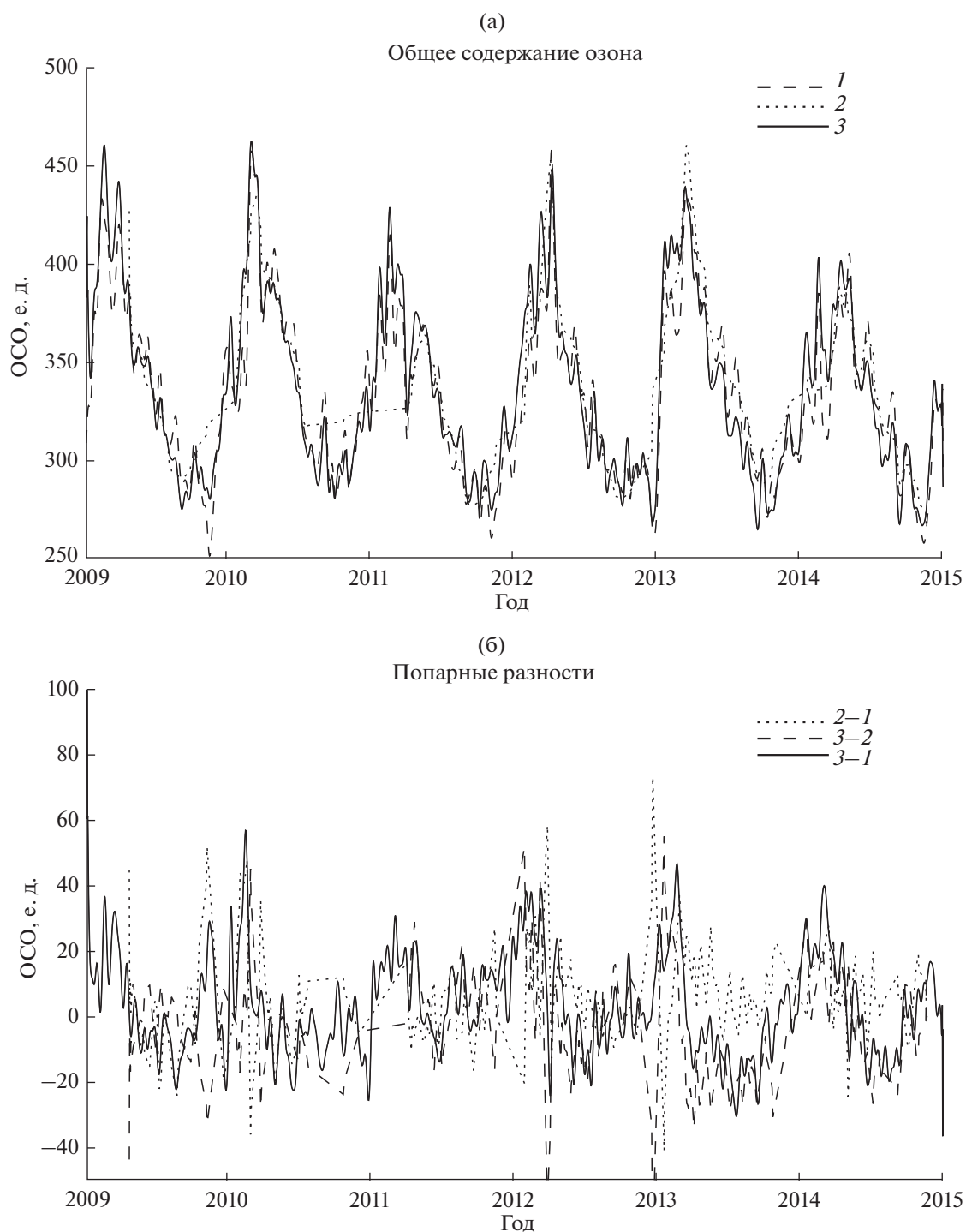


Рис. 1. а – Общее содержание озона вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2014 гг. по результатам наземных (1), спутниковых (2) измерений и численного моделирования (3); б – попарная разность между значениями ОСО.

ОСО отмечаются и максимальные расхождения как между данными измерений, так и между данными наблюдений и моделирования. Следует отметить, однако, что тенденции этих короткопериодных изменений в целом проявляются схожим образом в реальных и модельных данных

(рис. 1а), а величина расхождений связана с недооценкой/переоценкой амплитуд колебаний ОСО (рис. 1б).

Среди межгодовых отличий следует отметить кратковременное резкое увеличение ОСО в нача-

ле 2010 г., три максимума ОСО зимой—весной 2012 г., резкое увеличение ОСО в конце зимы—начале весны 2013 г. и наиболее низкие значения ОСО в максимуме зимой—весной 2014 г. по сравнению с другими годами. Кроме того, интерес представляет значительное уменьшение ОСО в начале весны 2011 г., отмеченное по результатам спутниковых наблюдений и моделирования (наземных измерений в этот период не было). Это сокращение ОСО может быть связано с экстремально низкими значениями ОСО в арктической зоне, вследствие крайне низких значений температуры в стратосфере на фоне устойчивого циркумполярного вихря [11, 30].

Сочетание численного моделирования и анализа результатов измерений позволяет выделить особенности изменений содержания озона в разных высотных диапазонах, а также идентифицировать причины отмеченных выше особенностей сезонной и межгодовой изменчивости ОСО. На рис. 2 приведены рассчитанные на модели и полученные по результатам наземных и спутниковых измерений изменения содержания озона в слое тропосферы и нижней стратосферы (0–25 км) и в слое верхней стратосферы и нижней мезосферы (25–60 км). В нижнем слое содержится примерно в два раза больше озона (среднее значение 240 е.Д.), чем в верхнем слое (среднее значение 100 е.Д.), при этом и сезонная изменчивость озона в нижнем слое выражена намного отчетливее (амплитуда колебаний 200 е.Д.), чем в верхнем слое (амплитуда колебаний 60 е.Д.). Межгодовые различия, наиболее характерные для периода зимне-весеннего максимума ОСО, также лучше выражены в нижнем слое. При этом следует отметить, что резкое уменьшение содержания озона в марте—апреле 2011 г., возможно, связанное с аномально глубокой озоновой дырой в Арктике в этот год, обнаруживается в обоих слоях.

Сравнение результатов наземных и спутниковых измерений и численного моделирования при сохранении отмеченных выше тенденций, характерных для ОСО, обнаруживает и особенности, присущие разным слоям атмосферы. В частности, результаты наземных измерений в 2009–2011 гг. занижают содержание озона в верхнем слое и завышают содержание в нижнем слое по сравнению с результатами спутниковых наблюдений и моделирования. Эти расхождения могут быть связаны с различиями систем вертикальных координат. Результаты спутниковых измерений представлены в изобарической системе координат [18], при восстановлении высотных профилей озона по наземным измерениям используется геометрическая высота [16], а результаты моделирования по-

лучаются на сигма-уровнях [20]. Для сравнения результатов, полученных на разных высотных сетках, необходимо учитывать изменчивость приземного давления и температуры на разных высотных уровнях. Их значения в тех географических точках, к которым привязаны наблюдения, могут отличаться, а в модели, имеющей довольно грубое разрешение в связи с необходимостью учитывать глобальные процессы при анализе достаточно длинных временных рядов, данные о давлении и температуре являются горизонтально усредненными по площади $280 \times 400 \text{ км}^2$.

Для более детального анализа были выбраны 2010 и 2011 гг., для которых, как видно из рис. 1, характерны межгодовые отличия в период сезонного зимне-весеннего максимума. На рис. 3а показано изменение ОСО в течение 2010–2011 гг., а на рис. 3б — высотно-временной разрез содержания озона по модельным данным. Содержание озона на рис. 3б — это значения, просуммированные между уровнями высотной сетки, приведенные в е.Д. Как показывают результаты модельных расчетов, максимальные значения содержания озона, так же как и наиболее четко выраженная временная изменчивость озона, отмечаются на высотах 15–30 км, т.е. на границе определенных выше высотных слоев. Отмеченное в феврале 2010 г. значительное увеличение содержания озона на высотах 20–40 км может быть связано с большим мажорным внезапным стратосферным потеплением (рис. 3в). Весеннее сокращение содержания озона в 2011 г., скорее всего, вызвано смещением циркумполярного стратосферного вихря с аномально низким в этот год содержанием озона [31, 32]. Кроме того, можно отметить, что в начале весны 2010 г. также отмечалось уменьшение содержания озона, которое, однако, не было таким значительным, как в 2011 г.

Для более четкой картины изменчивости содержания озона в разных высотных слоях на рис. 4 приведено рассчитанное на модели и полученное по результатам измерений изменение интегрального содержания озона в тропосфере (0–12 км), где на него могут влиять его локальные источники, в нижней стратосфере (12–30 км), где, согласно рис. 3, содержание озона максимально, а изменчивость наиболее ярко выражена, в средней стратосфере (30–40 км), где максимально отношение смеси озона, и в верхней стратосфере (40–60 км), где достигает максимума фотохимическая продукция озона. Результаты расчетов показывают, что характерная для ОСО сезонная изменчивость (рис. 1), отмечается во всех выделенных высотных диапазонах, несмотря на различия локальной продукции

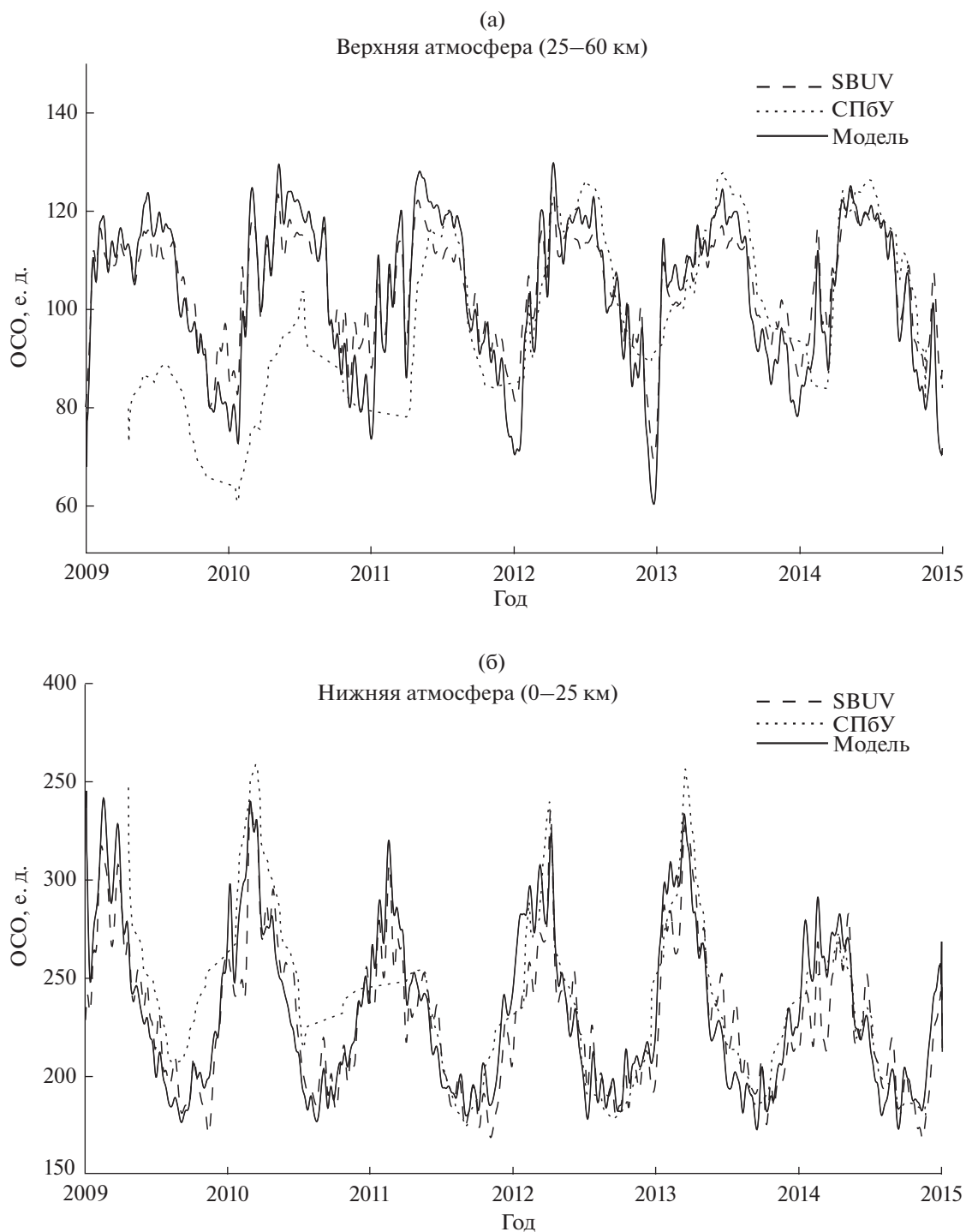


Рис. 2. Интегральное содержание озона в слое 25–60 км (а) и в слое 0–25 км (б) вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2014 гг.

озона. При этом, если зимне-весенний максимум практически на всех высотах наступает одновременно, то фаза осеннего минимума имеет высотный сдвиг. Самый ранний минимум в середине лета отмечается в верхней стратосфере, тогда как в средней стратосфере минимум сдви-

гается на конец года. В тропосфере и нижней стратосфере минимум содержания озона приходится на конец лета – начало осени. При этом увеличение содержания озона в нижней стратосфере начинается на 1–2 месяца раньше, чем в тропосфере. Максимальная межгодовая измен-

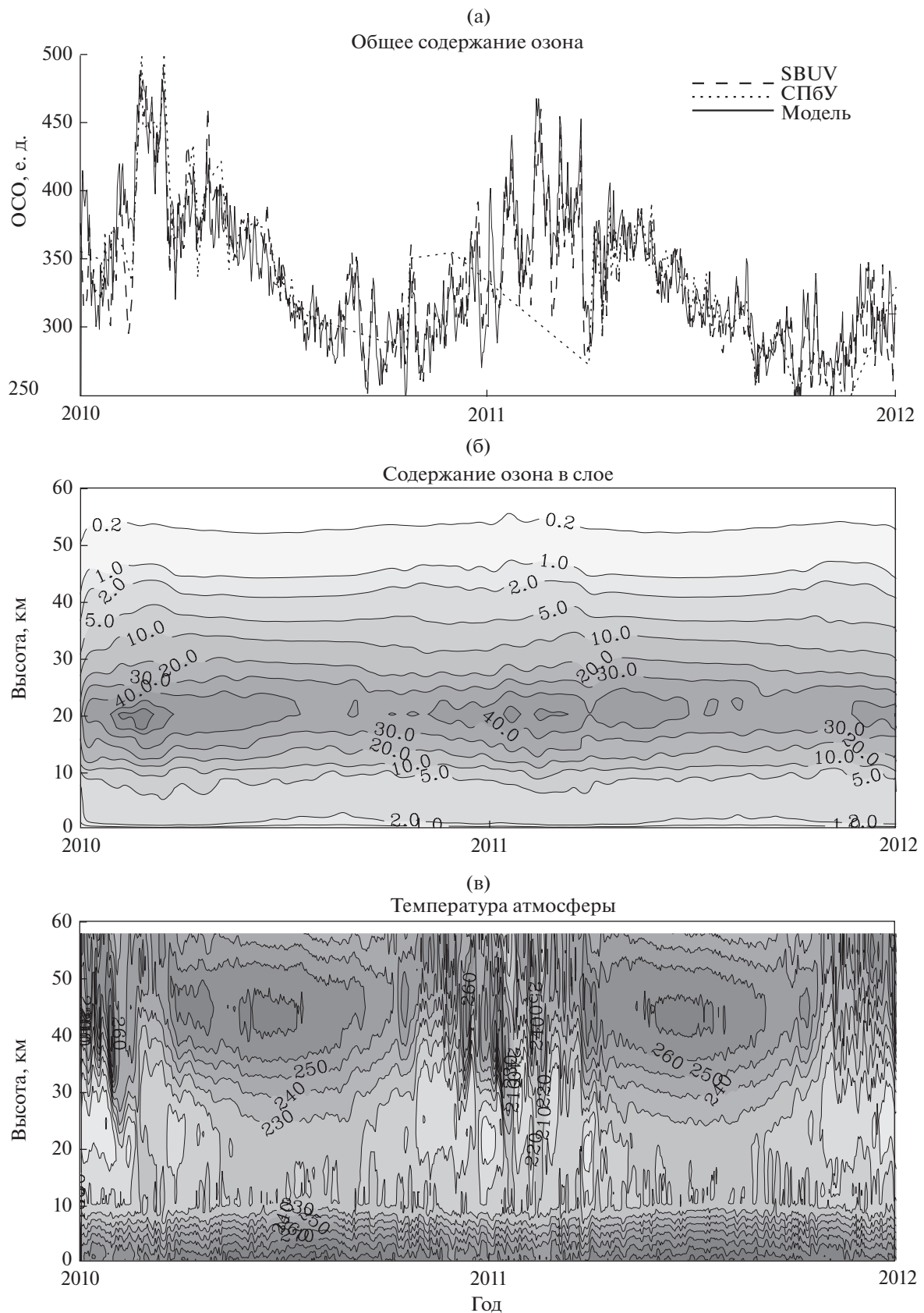


Рис. 3. Изменение в 2010–2011 гг.: общего содержания озона по результатам измерений и моделирования (а), содержания озона в высотных слоях по результатам моделирования (е.д.) (б), температуры (К) (в).

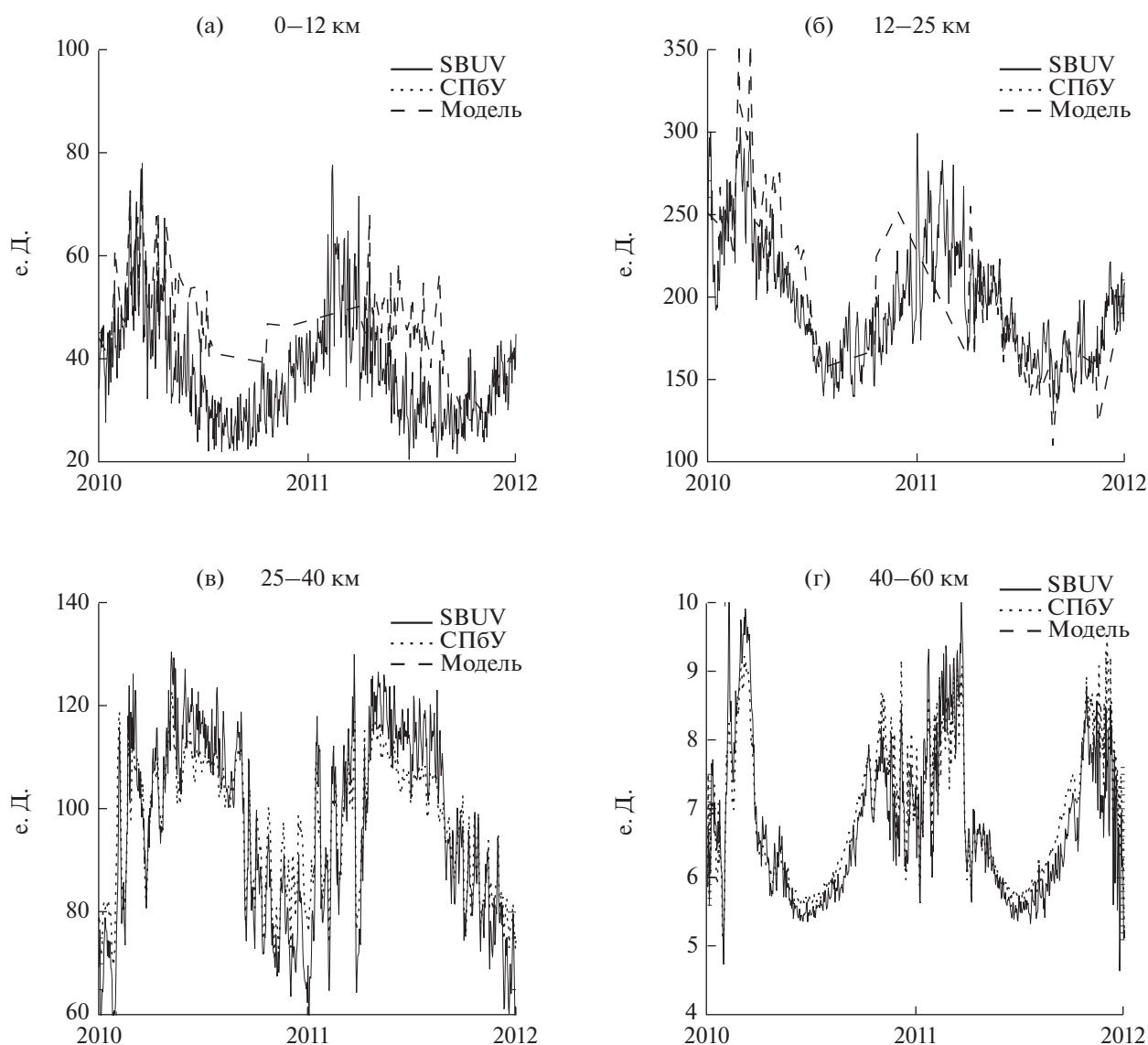


Рис. 4. Изменение содержания озона в 2010–2011 гг.: в тропосфере (а), нижней стратосфере (б), средней стратосфере (в) и верхней стратосфере (г).

чивость, как отмечалось выше, наблюдается в нижней стратосфере, а минимальная — в средней стратосфере.

Изменение содержания озона в атмосфере может вызываться как локальными фотохимическими факторами, так и разномасштабным атмосферным переносом. Для выделения роли фотохимических и динамических факторов в формировании наблюдаемых сезонных и межгодовых отличий ОСО исследовалась изменчивость локального образования и разрушения озона и влияние крупномасштабного переноса. На рис. 5 приведены рассчитанные на модели сезонно-высотные измене-

ния продукции и коэффициента разрушения озона для 2010 и 2011 гг. Их сезонная изменчивость определяется, главным образом, годовым ходом Солнца. При этом на всех высотах максимум продукции и разрушения озона отмечается летом, т.е. в период уменьшения ОСО. Начало осеннего увеличения ОСО запаздывает относительно максимума продукции на 3–4 месяца, что может быть результатом как замедленного влияния локальной продукции озона, так и воздействия динамических факторов. При этом зимне-весенний максимум ОСО приходится на период минимальной продукции и, следовательно, не может объясняться локальными факторами.

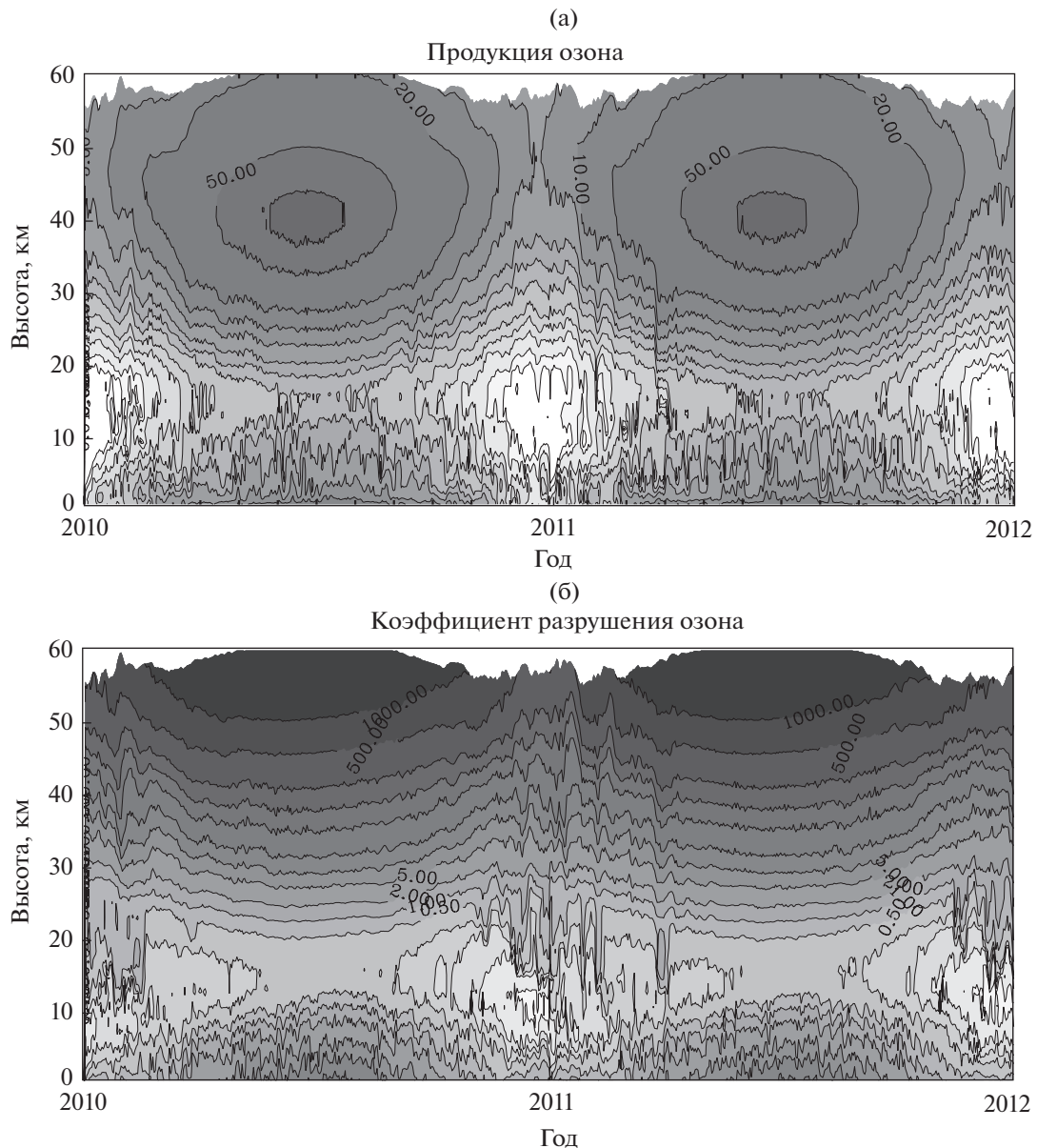


Рис. 5. Высотно-временной разрез изменения в 2010–2011 гг. продукции (10^5 молек/см³/с) (а) и коэффициента разрушения (10^{-7} с⁻¹) (б) озона.

Максимальные значения продукции озона отмечаются на высотах 35–40 км, где максимально произведение увеличивающейся с высотой интенсивности солнечной радиации и уменьшающейся с высотой концентрации молекулярного кислорода, являющейся основным источником озона. Для высотного изменения коэффициента разрушения озона (его произведение на концентрацию озона есть скорость фотохимического разрушения озона), характерно увеличение с высотой во всей стратосфере. В тропосфере максимальная локальная продукция озона, как и его разрушение,

отмечаются вблизи земной поверхности и также зависят от годового движения Солнца, имея максимум в летний период.

Для локальной изменчивости содержания озона важна разность продукции и разрушения. Она приведена на рис. 6 в среднем для каждого из четырех высотных диапазонов. Следует отметить, что в тропосфере продукция озона преобладает над его разрушением в конце лета и начале осени, что может внести определенный вклад в осенний рост содержания озона. В нижней стратосфере продукция озона превосходит его разрушение

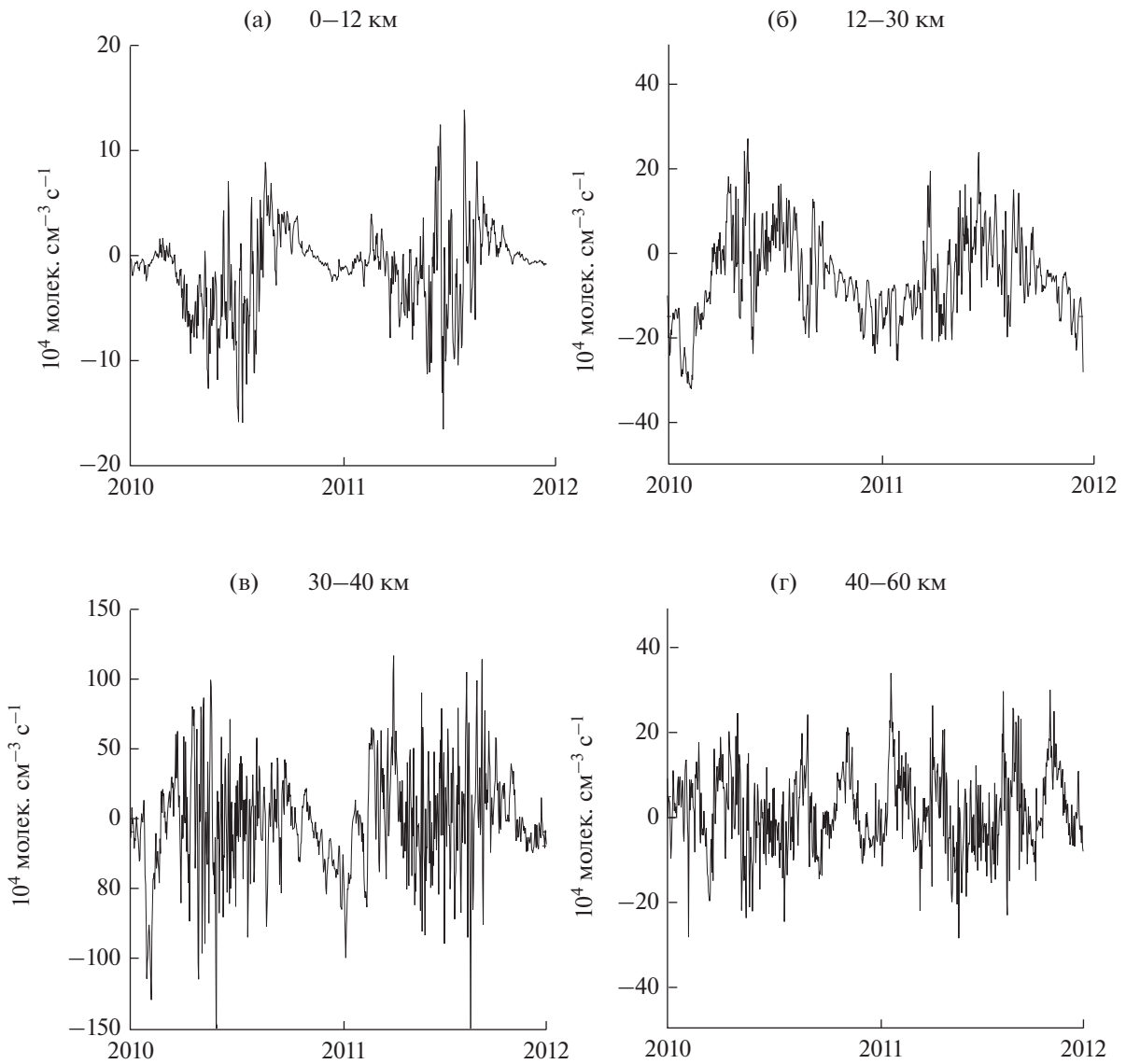


Рис. 6. Изменение фотохимического баланса (продукция минус разрушение) озона в 2010–2011 гг., в тропосфере (а), нижней стратосфере (б), средней стратосфере (в) и верхней стратосфере (г).

лишь в течение короткого периода летом, а в средней и верхней стратосфере продукция озона доминирует над его разрушением весной и в конце лета—начале осени. Следует отметить, что в период формирования зимне-весеннего максимума ОСО в локальных процессах преобладает разрушение озона, связанное с его избытком вследствие действия динамических процессов. В период формирования весенней аномалии ОСО в конце марта 2011 г. ни в одном высотном диапазоне не зарегистрировано локальное увеличение разрушения озона, что является признаком того, что аномалия ОСО над Санкт-Петербургом в этот период есть результат переноса.

Влияние динамических факторов на содержание озона может выражаться через горизонтальный и вертикальный перенос. В горизонтальном переносе определяющую роль играет меридиональная составляющая. На рис. 7 приведено сезонное изменение меридиональной компоненты скорости ветра для тех же высотных интервалов, что и ранее. Можно отметить, что для тропосферы характерна сильная короткопериодная изменчивость меридиональной скорости в течение всех сезонов, а в стратосфере наибольшие вариации меридиональной скорости наблюдаются в зимне-весенний период. При этом в нижней стратосфере, где отмечалось наибольшие межгодовые из-

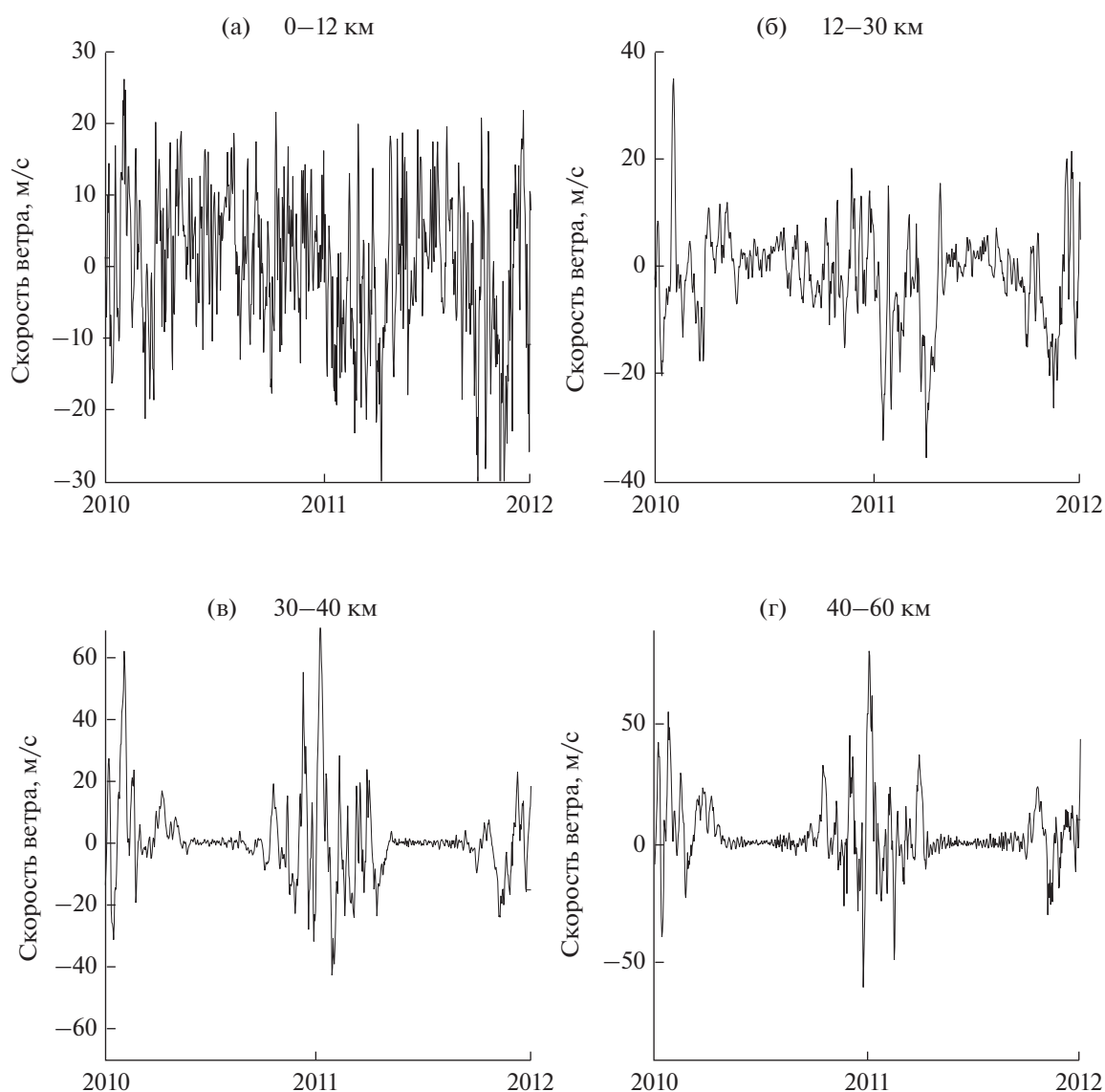


Рис. 7. Изменение меридиональной скорости ветра в 2010–2011 гг. в тропосфере (а), нижней стратосфере (б), средней стратосфере (в) и верхней стратосфере (г).

менения содержания озона (рис. 4), периодам максимума ОСО соответствует положительное (с юга на север), а периодам уменьшения содержания озона – отрицательное направление меридиональной скорости. Один из максимумов потока со стороны Арктики наблюдался как раз в период арктической весенней озоновой аномалии 2011 г.

Для локального баланса содержания озона важную роль играет не только величина и направление переноса, но и дивергенция потока озона, определяющая тенденцию к накоплению (конвергенция) или уменьшению (дивергенция) содержания озона. На рис. 8 приведена рассчитанная на модели дивергенция меридионального по-

тока для исследуемых вертикальных диапазонов. Для наиболее интересного диапазона нижней стратосферы 15–30 км отрицательные значения дивергенции (конвергенция) меридионального потока отмечаются в периоды увеличения ОСО, а положительные значения соответствуют периодам уменьшения содержания озона. Наиболее значительная конвергенция наблюдается зимой 2010 г., предшествуя резкому максимуму ОСО (рис. 1). При этом область конвергенции охватывает всю стратосферу. Для периода аномального уменьшения содержания озона весной 2011 г. резкого увеличения дивергенции не наблюдается,

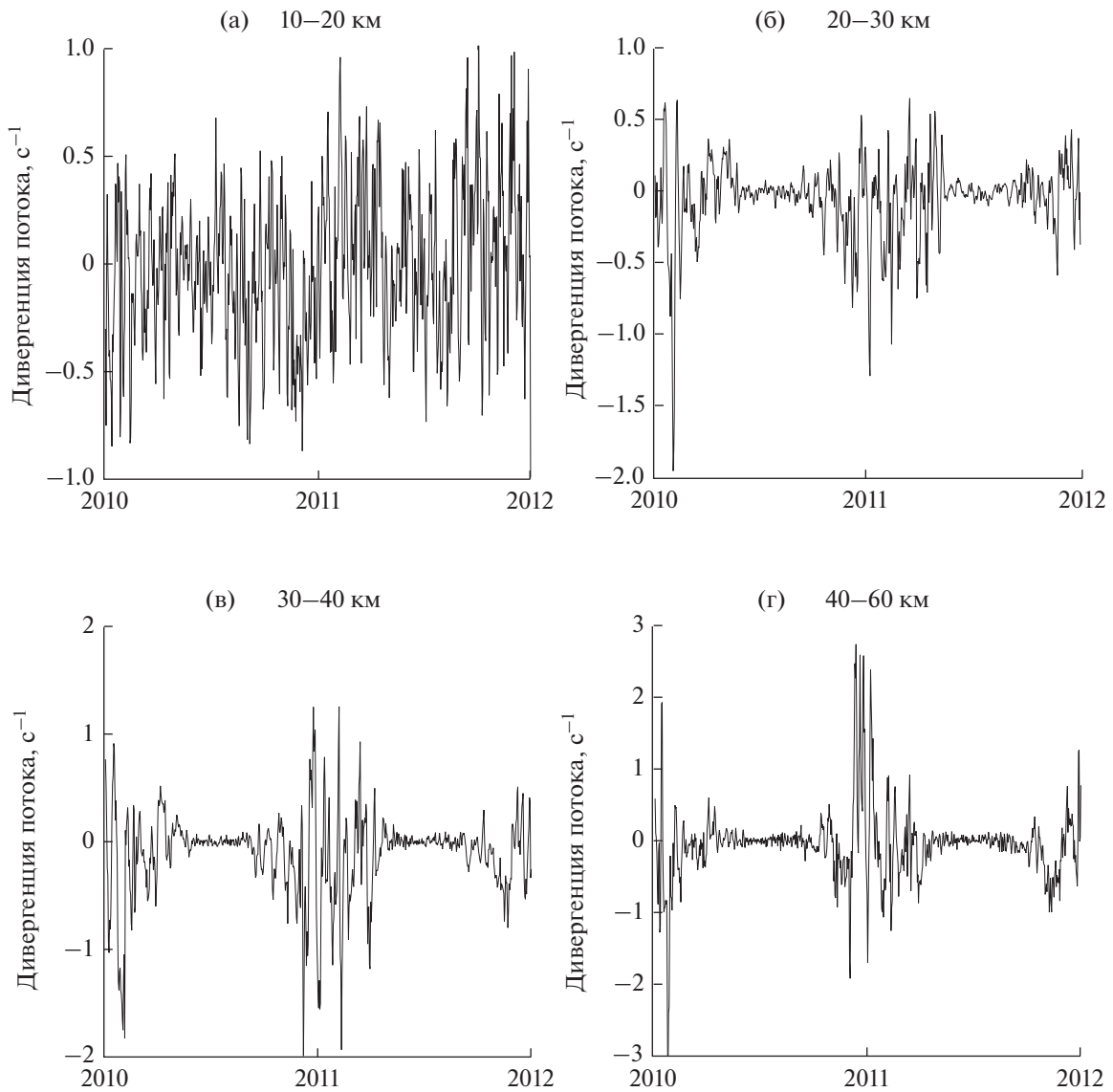


Рис. 8. Изменение дивергенции меридионального потока в 2010–2011 гг. в тропосфере (а), нижней стратосфере (б), средней стратосфере (в) и верхней стратосфере (г).

что говорит об арктическом направлении переноса, как было показано при анализе на рис. 7.

Для проверки влияния дивергенции меридионального потока на вариации ОСО на рис. 9 приведены изменения дивергенции в стратосфере в течение всего исследуемого периода. Так же как и для периода 2010–2011 г., конвергенция меридионального потока предшествует зимне-весеннему максимуму озона, а положительные значения дивергенции характерны для начала периода весенне-летнего уменьшения ОСО. Максимальная конвергенция отмечается зимой 2010 г. в нижней стратосфере и зимой 2012 г. — в средней стратосфере. Это приводит к

формированию максимума содержания озона в нижней части стратосферы в 2010 г. (рис. 4) и в верхней части стратосферы в 2012 г. (рис. 2). В конце 2013–начале 2014 гг. отмечается необычный всплеск положительных значений дивергенции в нижней и средней стратосфере. Это означает формирование области расхода содержания озона, что приводит к необычно низкому максимуму ОСО зимой-весной 2014 г.

Изменениям горизонтальной дивергенции потока по закону сохранения массы сопутствуют изменения дивергенции вертикального потока, что, в связи с разной скоростью разрушения озона в разных вертикальных слоях, как видно на

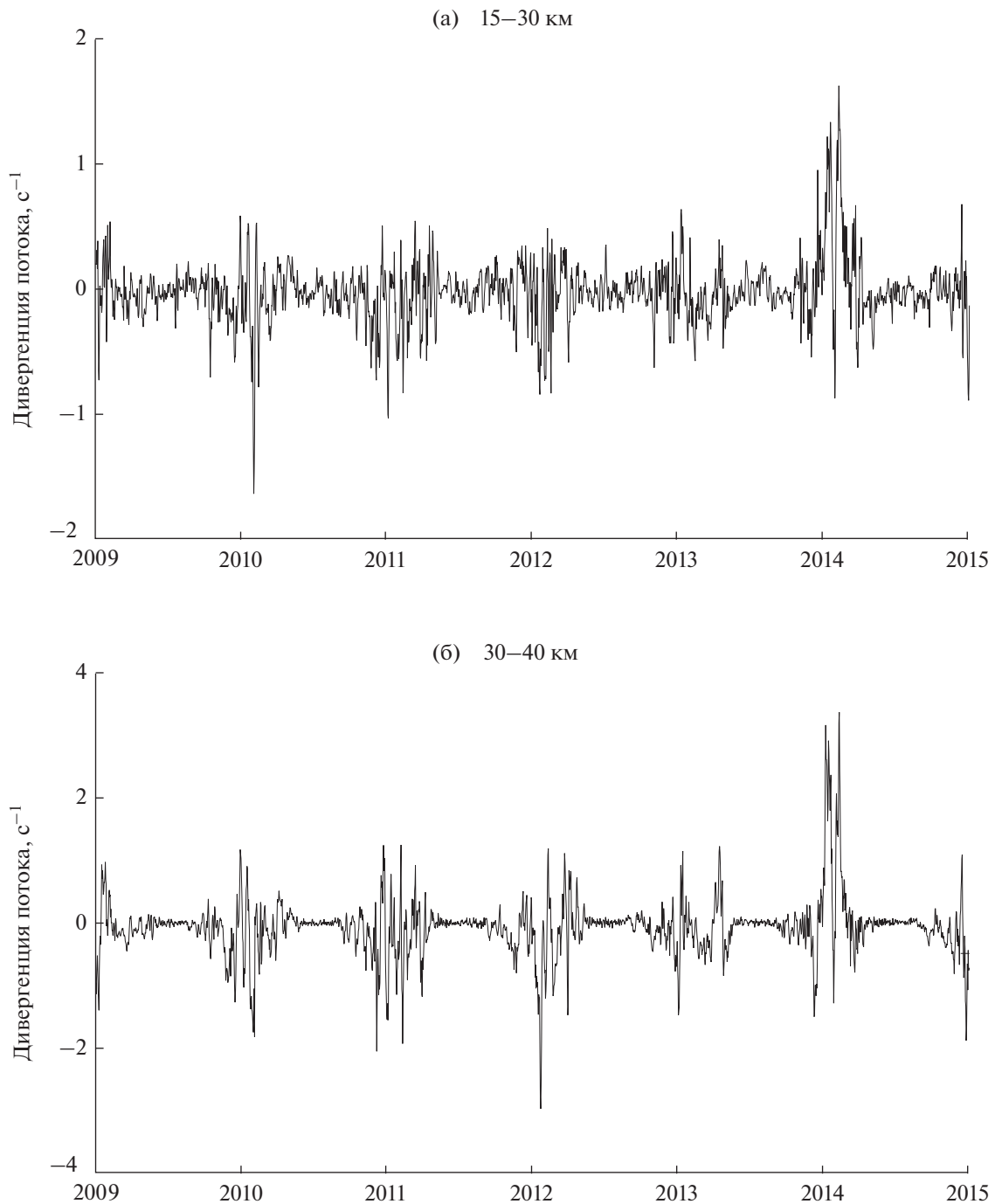


Рис. 9. Изменение дивергенции меридионального потока в 2009–2014 гг. в нижней стратосфере (а) и средней стратосфере (б).

рис. 5, может привести к увеличению перемещения озона в слой с большим (меньшим) разрушением, в результате чего может происходить уменьшение (увеличение) его интегрального содержания. Для анализа влияния изменчивости вертикальной скорости ветра на вариации ОСО на рис. 10 приведено расчетное изменение ана-

лога вертикальной скорости ветра в сигма-системе координат для всего исследуемого периода 2009–2014 гг. Можно отметить, что положительные значения вертикальной скорости ветра, что в сигма-системе координат соответствует опусканию воздуха, характерны для зимнего периода увеличения ОСО. Это связано с уменьшением

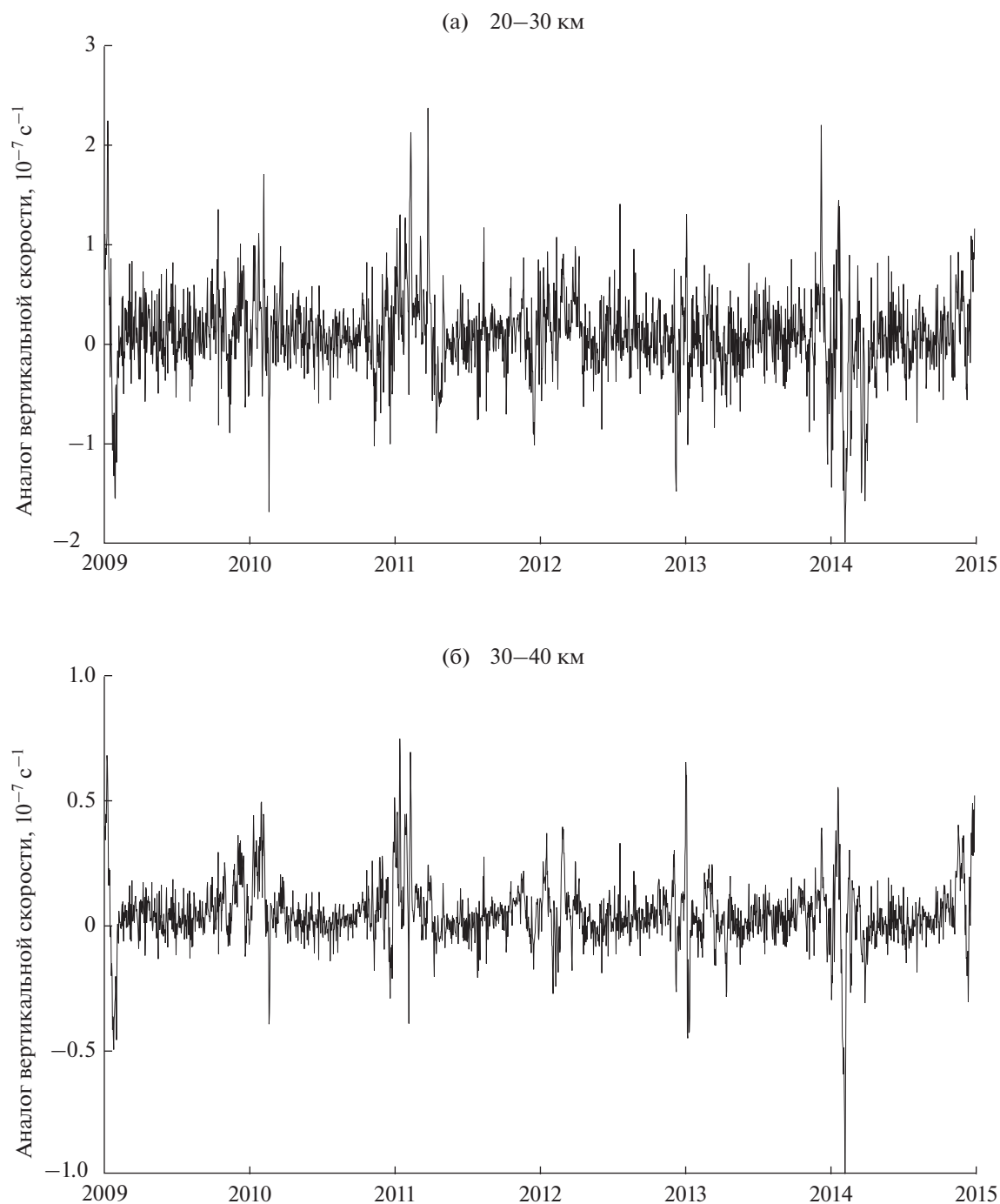


Рис. 10. Изменение аналога вертикальной скорости ветра в 2009–2014 гг. в нижней стратосфере (а) и средней стратосфере (б).

скорости разрушения озона с высотой в стратосфере (рис. 5), что приводит к дополнительному накоплению озона. Для отрицательных значений вертикальной скорости ветра (подъем воздуха в используемой системе координат) характерно увеличение разрушения озона на больших

высотах и соответствующее сокращение содержания озона. Наиболее четко это прослеживается в начале 2009 г., весной 2011 г. в нижней стратосфере и особенно в начале 2014 г., когда наблюдались необычно низкие для зимнего периода значения ОСО (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен анализ изменчивости содержания атмосферного озона вблизи Санкт-Петербурга в 2009–2014 гг. на основе сопоставления результатов наземных измерений на станции Петергоф с данными спутниковых наблюдений с помощью прибора SBUV и результатами численного моделирования с использованием глобальной модели состава нижней и средней атмосферы. Значения температуры, скоростей ветра, влажности воздуха и приземного давления в модели задавались по данным реанализа MERRA. По совокупности результатов рассмотрения результатов измерений, численного моделирования и данных реанализа идентифицированы высотные особенности сезонных и межгодовых изменений общего содержания озона вблизи Санкт-Петербурга, а также оценена роль фотохимических и динамических факторов в изменчивости содержания озона в разных высотных диапазонах.

Сравнение результатов наземных и спутниковых измерений с результатами численного моделирования показало, что глобальную модель с относительно грубым пространственным разрешением можно использовать для анализа результатов локальных измерений, что позволяет изучать влияние крупномасштабных процессов на сезонную и межгодовую изменчивость содержания стратосферных газов, таких как озон. Расхождения между результатами моделирования и измерений по порядку величины соответствуют расхождениям между результатами наблюдений разных типов. При этом и результаты измерений, и результаты моделирования в целом одинаково описывают основные долгопериодные и краткосрочные изменения содержания озона в разных высотных слоях, а расхождения между ними связаны, главным образом, с недооценкой или переоценкой амплитуд изменчивости содержания озона, что может быть вызвано расхождением координат и степени локализации данных измерений и пространственным разрешением модели.

Анализ показал, что сезонные изменения содержания озона происходят во всей тропосфере и стратосфере, при этом максимальные амплитуды вариаций отмечаются в тропосфере и нижней стратосфере. Наиболее значительная межгодовая изменчивость содержания озона характерна для слоев нижней (12–30 км) и средней (30–40 км) стратосферы. Зимне-весенний максимум содержания озона наступает практически одновременно в разных высотных слоях, а момент достижения осеннего минимума имеет высотный сдвиг.

Фотохимическая продукция и разрушение озона максимальны в летний период, когда отмечается уменьшение содержания озона, и оказывают на него определенное воздействие, главным образом, в нижней и верхней стратосфере. В нижней стратосфере основную роль в сезонной изменчивости и межгодовых вариациях содержания озона играют динамические факторы, среди которых основными являются крупномасштабный меридиональный перенос в сторону полюса зимой и весной и со стороны полюса летом, дивергенция меридионального потока, определяющая накопление или расход озона, а также вертикальный перенос озона вниз, что способствует накоплению озона, или в верхнюю часть стратосферы, что приводит к более быстрому разрушению озона.

Анализ результатов измерений и моделирования выполнен в рамках проекта 14-17-00096 Российского научного фонда. Глобальная модель изменения состава нижней и средней атмосферы на основе данных реанализа MERRA разработана в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках госзадания Министерства образования и науки РФ. Межгодовая изменчивость потоков солнечной радиации задавалась в модели по результатам исследований проекта 14-05-00871-а Российского фонда фундаментальных исследований. Авторы выражают благодарность анонимному рецензенту за полезные предложения по улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 296 с.
2. Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М. Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 192 с.
3. Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 288 с.
4. Брасье Г., Соломон С. Аэрономия средней атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 291 с.
5. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 52, 2011. Geneva, Switzerland, 516 p.
6. Jacob J.D. Introduction to atmospheric chemistry. Princeton: Princeton University Press, 1999. 264 p.
7. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, 2006. 1203 p.

8. *Brasseur G.P., Orlando J.J., Tyndal G.S.* Atmospheric Chemistry and Global Change. Oxford: Oxford University Press, 1999. 688 p.
9. *Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J.* On the depletion of Antarctic ozone // *Nature*. 1986. V. 321. P. 755–758.
10. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion, A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. P. 275–316.
11. *Strahan S.E., Douglass A.R., Newman P.A.* The contributions of chemistry and transport to low arctic ozone in March 2011 derived from Aura MLS observations // *J. Geophys. Res. Atmos.* V. 118. P. 1563–1576, 2013 doi 10.1002/jgrd.50181
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-спектрометрии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. № 2. С. 191–200.
13. *Sovde O.A., Gauss M., Smyshlyayev S.P., Isaksen I.* Evaluation of the chemical transport model Oslo CIM2 with focus on Arctic winter ozone depletion century // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. № D9. D09304.
14. *Geller M.A., Smyshlyayev S.P.* A model study of total ozone evolution 1979–2000 – The role of individual natural and anthropogenic effects // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. № 22. P. 2048, doi 10.1029/2002GL015689
15. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Сравнение спутниковых и наземных измерений общего содержания озона // *Исследование Земли из космоса*. 2013. № 4. С. 83–91.
16. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Ионов Д.В., Поберовский А.В., Шаламянский А.М.* Наземные измерения общего содержания озона ИК-методом // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2011. Т. 47. № 4. С. 521–532.
17. *Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R. et al.* MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *J. Climate*. 2011. V. 24. P. 3624–3648, doi 10.1175/JCLI-D-11-00015.1
18. *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.* 1996. V. 101. № D13. P. 18793–18806, doi 10.1029/96JD01165
19. *Bhartia P.K., McPeters R.D., Flynn L.E., Taylor S., Kratmarova N.A., Frith S., Fisher B., MeLind M.* Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm. // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. № 6. P. 2533–2548
20. *Галин В.Я., Смышляев С.П., Володин Е.М.* Совместная химико-климатическая модель атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 4. С. 437–452.
21. *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 // *Метеорология и гидрология*. 2005. № 8. С. 25–37.
22. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Атласкин Е.М., Блакитная П.А.* Моделирование непрямого влияния одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на газовый состав атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2010. Т. 46. № 5. С. 672–684.
23. *Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я.* Моделирование влияния грозовой активности на газовый состав атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46. № 4. С. 487–504.
24. *Sander S.P., Abbatt J., Barker J.R., Burkholder J.B., Friedl R.R., Golden D.M., Huie R.E., Kolb C.E., Kurylo M.J., Moortgat G.K., Orkin V.L., Wine P.H.* Chemical kinetics and photochemical data for use in atmospheric studies. Evaluation 17. JPL Publication 10–6, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2011.
25. *Dvortsov V.L., Zvenigorodsky S.G., Smyshlyayev S.P.* On the use of Isaksen-Luther method of computing photodissociation rates in photochemical models // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № D21. P. 26401–26417. doi 10.1029/1999JD900820
26. *DeWolfe A.W., Wilson A., Lindholm D.M., Pankratz C.K., Snow M.A., Woods T.N.* Solar irradiance data products at the LASP Interactive Solar Irradiance Data Center (LISIRD) // *American Geophysical Union, Fall Meeting 2010*, abstract № GC21B-0881.
27. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Блакитная П.А., Лемущенко А.К.* Исследование чувствительности состава и температуры стратосферы к вызванной 11-летним циклом солнечной активности изменчивости спектральных потоков солнечной радиации // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52. № 1. С. 19–36.
28. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Шаарийбуу Г., Моцаков М.А.* Моделирование изменчивости газовых и аэрозольных составляющих в стратосфере полярных районов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2010. Т. 46. № 3. С. 291–306.
29. *Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А.* Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016. Т. 56. № 1. С. 102–117.
30. *Wilks D.S.* Statistical methods in the atmospheric sciences – International geophysics series. V. 91. Oxford: Elsevier, 2006. 627 p.
31. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Отрицательная аномалия стратосферного содержания NO₂ над Звенигородом в конце марта–начале апреля 2011 г. // *Доклады АН*. 2012. Т. 447. № 3. С. 326–330.
32. *Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С., Гришаев М.В.* Зимнее-весенние аномалии стратосферного содержания по результатам наземных измерений // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51. № 4. С. 455–463.

МЕЖГОДОВЫЕ И СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В РАЗНЫХ ВЫСОТНЫХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. П. Смышляев^{1, *}, Я. А. Виролайнен^{2, **}, М. А. Моцаков¹, Ю. М. Тимофеев²,
А. В. Поберовский², and А. В. Поляков²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

²Санкт-Петербургский государственный университет 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
*E-mail: smyshl@rshu.ru

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

Поступила в редакцию 26.02.2016 г.

После доработки 20.05.2016 г.

Выполнен анализ изменчивости содержания атмосферного озона в разных высотных слоях в окрестности Санкт-Петербурга в 2009–2014 гг. на основании сопоставления результатов наземных измерений на станции Петергоф с результатами спутниковых измерений с помощью прибора SBUV и результатами численного моделирования. В модели температура, скорость ветра, влажность воздуха и приземное давление задавались по данным ре-анализа MERRA. По совокупности результатов измерений, численного моделирования и реанализа идентифицированы особенности сезонных и межгодовых изменений содержания озона в разных высотных слоях, а также оценена роль фотохимических и динамических факторов в вариациях содержания озона.

Ключевые слова: содержание озона, наземные измерения, численное моделирование, сезонная и межгодовая изменчивость.