

УДК 551.510.41

## ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В СУБАРКТИКЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2017 г. Г. М. Швед<sup>1,\*</sup>, Я. А. Виролайнен<sup>1</sup>, Ю. М. Тимофеев<sup>1</sup>, С. И. Ермоленко<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  
199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

\*E-mail: g.shved@spbu.ru

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет  
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98

<sup>3</sup>Технологический институт Карлсруэ, Вычислительный центр им. К. Штайнбуха  
Кайзерштрассе 12, 76131 Карлсруэ, Германия

Поступила в редакцию 03.11.2016 г.

После доработки 11.01.2017 г.

Представлены Фурье- и вейвлет-спектры временных рядов полного содержания озона в слоях атмосферы 0–25 и 25–60 км по спутниковым измерениям SBUV и моделям РГГМУ и ЕМАС для трех субарктических пунктов (Санкт-Петербург, Харестуа и Кируна) за период 2000–2014 гг. Фурье-спектры показывают периодичности в диапазоне от ~ 10 суток до ~ 10 лет, а вейвлет-спектры – в диапазоне от ~ 1 суток до ~ 2 лет. В целом, спектры, полученные по результатам моделирования, согласуются со спектрами по данным измерений. В то же время имеются некоторые различия как между измерениями и моделями, так и между самими моделями. Различия прежде всего касаются области периодов волн Россби, а также 11-летней периодичности и полугодовых осцилляций. Указаны возможные причины данных различий.

**Ключевые слова:** состав атмосферы, вариации содержания озона, спутниковые измерения состава, модели состава атмосферы, субарктика.

DOI: 10.7868/S000335151801004X

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное уменьшение содержания озона, прежде всего в виде “озоновых дыр” над Антарктидой, обнаружено в 80-х годах прошлого столетия [1]. Уменьшение содержания озона наблюдалось и на других широтах земного шара. Например, регулярно наблюдаются “минидыры” озона на высоких и средних широтах Северного полушария [2, 3]. От толщины озонового слоя зависит количество ультрафиолетового (УФ) солнечного излучения, достигающего поверхности планеты, причем избыток его ухудшает экологическую обстановку [4]. Озон играет существенную роль в радиационном балансе стратосферы и в значительной степени определяет ее термическую структуру. Наконец, высокие концентрации приземного озона оказывают негативное воздействие на здоровье человека и растительность.

Эти и другие особенности озона являются причиной многочисленных экспериментальных и модельных исследований содержания озона. Регулярные данные как по общему содержанию озона (СО), так и по его вертикальному распределению поставляют наземные и спутниковые системы мониторинга озона. Для описания пространственных и временных вариаций содержания озона в атмосфере, включая прогноз полного восстановления озонового слоя, используются численные трехмерные модели атмосферы и ее состава. Данная статья посвящена исследованию временных вариаций содержания озона за 15 лет по данным спутниковых измерений и численным моделям для трех пунктов наблюдений в субарктике – Санкт-Петербурга (59.9° N, 29.8° E), Харестуа (60.2° N, 10.8° E) и Кируны (67.8° N, 20.4° E). На основании сопоставления данных измерений и численного моделирования анализируется качество используемых численных моделей.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ  
И ИХ ОБРАБОТКА

В качестве спутниковых измерений использовались данные измерений прибором Solar Backscatter Ultraviolet Instrument (SBUV), который позволяет получать содержание озона от высот тропосферы до нижней мезосферы. Приборы типа SBUV измеряют рассеянное и отраженное солнечное УФ-излучение. Описание прибора, алгоритмов интерпретации измерений и анализ их погрешностей приведены, например, в работе [5].

Для моделирования содержания озона использовались химико-транспортная модель состава нижней и средней атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (далее в тексте РГГМУ, на рисунках RSHU) [6] и химико-климатическая модель EMAC (ECHAM/MESy Atmospheric Chemistry) [7]. Основное различие между моделями заключается в том, что в модели EMAC изменчивость параметров атмосферы рассчитывается

с использованием ассимиляции результатов реанализа ERA-INTERIM [8], а в модели РГГМУ в качестве параметров атмосферы напрямую используются данные реанализа MERRA [9]. Подробное описание моделей и примеры результатов их использования приведены в статьях [10–12].

Сравнения ансамблей осуществлены для периода с января 2000 г. по июнь 2014 г. Анализ проводится для содержания озона в вертикальном столбе атмосферы с единичной площадью его горизонтального сечения отдельно для слоев 0–25 и 25–60 км. Указанное разделение физически обосновывается тем, что содержание озона в слое 25–60 км, как правило, определяется фотохимическими процессами, тогда как в слое 0–25 км в основном контролируется динамическими процессами в атмосфере. Ряды измерений содержания озона для слоев 0–25 и 25–60 км, полученные прибором SBUV для Санкт-Петербурга, Харестуа и Кируны, были подвергнуты спектральному анализу Фурье по методу Ломба–Скаргла (рис. 1). К рядам для Санкт-Петербурга также было

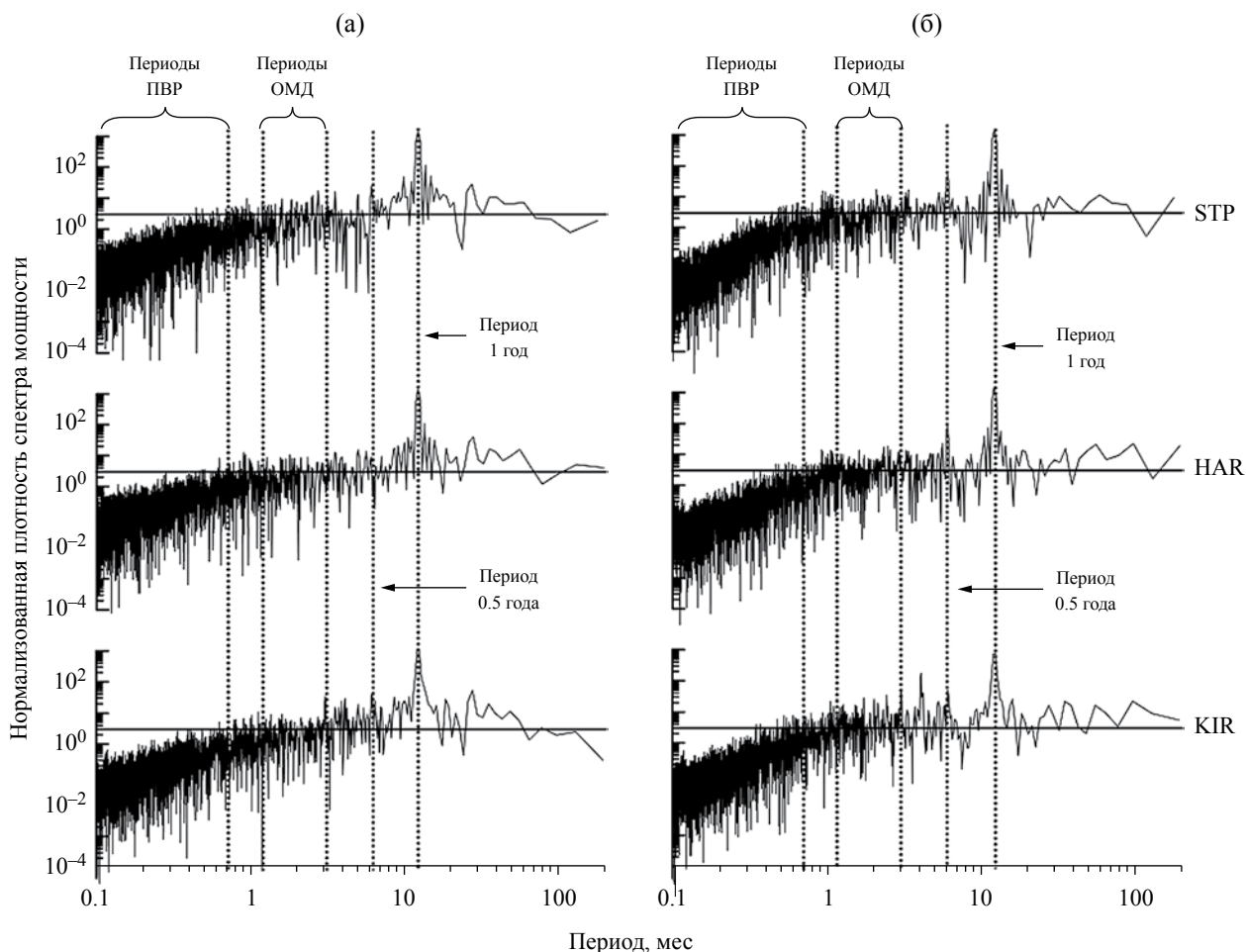
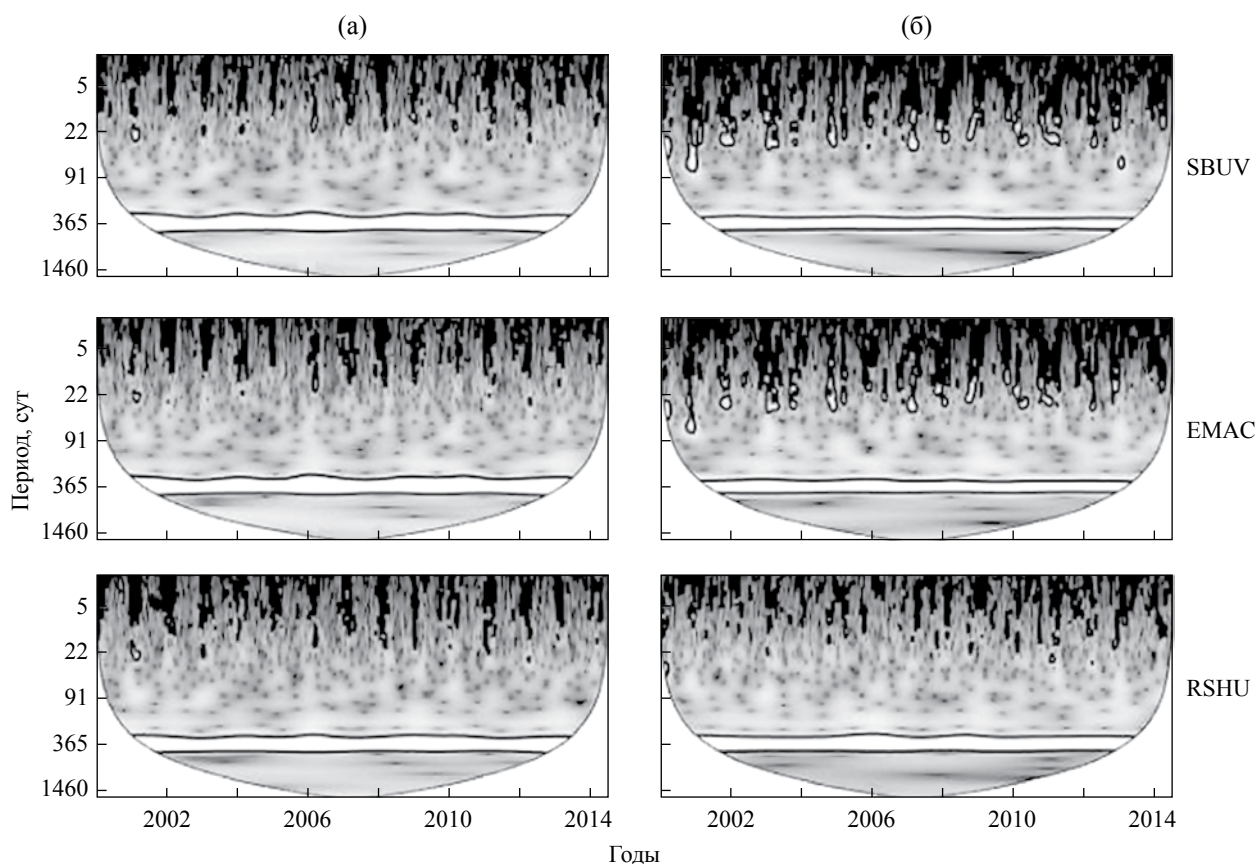


Рис. 1. Фурье-спектры вариаций содержания озона в слоях 0–25 км (а) и 25–60 км (б) по данным измерений прибором SBUV для трех наземных станций: STP – Санкт-Петербург, HAR – Харестуа, KIR – Кируна. Диапазоны периодов планетарных волн Россби (ПВР) и осцилляций Маддена–Джулиана (ОМД) ограничены вертикальными линиями. Горизонтальная линия соответствует уровню достоверности 95%.



**Рис. 2.** Вейвлет-спектры вариаций содержания озона над Санкт-Петербургом в слоях 0–25 км (а) и 25–60 км (б) по данным измерений прибором SBUV и данным моделирования EMAC и РГМУ (RSNU). Контурные линии, включая зачерненные области, соответствуют уровню достоверности 95%.

применено вейвлет-преобразование Морле 6 (рис. 2) [13]. В результате по Фурье-спектрам были выявлены периодичности в диапазоне периодов от  $\sim 10$  суток до  $\sim 10$  лет. Вейвлет-спектры уверенно демонстрируют периодичности с периодами от  $\sim 1$  суток до  $\sim 2$  лет. Все полученные периодичности уже регистрировались в вариациях содержания озона ранее. Классификация периодических вариаций ОСО и детальный обзор литературы по ним сделаны в статье [14].

Санкт-Петербург и Харестуа находятся практически на одной широте и отдалены друг от друга на сравнительно небольшое расстояние — около 1000 км. Поскольку, как будет видно ниже, основные особенности спектров вариаций содержания озона определяются глобальными процессами в атмосфере, их основные особенности над этими пунктами ожидаемо совпадают. Хотя станция Кируна от указанных пунктов отдалена примерно на такое же расстояние, она находится за Северным полярным кругом. Это обстоятельство приводит как к сильным изменениям в фотохимии озона, так и не позволяет измерять содержание озона прибором SBUV в некоторой временной окрестности зимнего солнцестояния.

### 3. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА НАБЛЮДАЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ

Наиболее короткопериодные особенности полученных Фурье- и вейвлет-спектров вариаций озона обязаны своим появлением инерционным (вращательным) собственным колебаниям атмосферы — планетарным волнам Россби. Эти волны разделяются на семейства с характерными периодами 2, 4, 5, 6.5, 10, 16 и 30 суток [15]. Все эти семейства уже регистрировались ранее при наблюдении вариаций ОСО спутниковыми и дистанционными наземными методами [14, 16–20], включая регистрацию волн Россби с периодами  $\sim 5$ –10 суток по данным SBUV [21, 22]. Как уже указывалось выше, Фурье-спектры показывают статистически значимые волны Россби, только начиная с периодов  $\sim 10$  суток. В то же время вейвлет-спектры демонстрируют все их семейства. Последнее наглядно следует из того, что волны Россби интенсифицируются в Северном полушарии в зимнюю половину года, как уже замечено в [15]. Эта особенность в возбуждении волн Россби выявляется в вейвлет-спектрах также при обработке рядов

наземных барометрических и даже сейсмометрических измерений [23].

Еще два источника периодических возмущений атмосферы имеют период около 1 месяца. Во-первых, вращение Солнца вокруг собственной оси с периодом 27 суток приводит к вариациям приходящего в атмосферу солнечного УФ-излучения [24]. Во-вторых, обращение Луны вокруг Земли с синодическим периодом 29.53 суток, за время которого фазы Луны проходят полный цикл, возмущает гравитационное поле Земли, что приводит к приливным движениям атмосферы.

Амплитуда волн Россби и приливов возрастает с высотой [25]. Соответственно, с высотой растут связанные с волнами вариации температуры и плотности атмосферы, влияющие на скорость фотохимических процессов, определяющих содержание озона. Также усиливается с высотой воздействие поглощения солнечного УФ-излучения на процессы в атмосфере. Это воздействие может трансформироваться в изменение скоростей образования и гибели озона за счет вариаций в скорости диссоциации молекул солнечным излучением, поскольку приводит как к вариациям в концентрации продуктов фотодиссоциации, вступающих в химические реакции, так и к изменению температуры атмосферы, связанному с ее нагреванием при поглощении солнечного излучения и влияющему на скорость химических реакций. Период вращения Солнца 27 суток обнаружен в вариациях содержания озона в верхней стратосфере по измерениям SBUV [26]. Итак, выглядит естественным, что проявление периодичностей в диапазоне периодов  $\sim 2$ –30 суток в Фурье- и вейвлет-спектрах вариаций содержания озона в слое 25–60 км оказывается сильнее, чем в слое 0–25 км (рис. 1 и 2).

Причиной наблюдаемых так называемых внутрисезонных колебаний всех параметров атмосферы являются осцилляции Маддена–Джулиана (ОМД), которые формируются в тропической тропосфере [27]. Временные интервалы между обусловленными ОМД возмущениями атмосферы варьируют в широких пределах — от 1 до 3 месяцев. А в качестве характерного периода ОМД можно принять 50 суток. Вариации ОСО в указанном диапазоне периодов ранее уже наблюдались [14]. Рассматриваемые здесь Фурье- и вейвлет-спектры показывают возмущение содержания озона в обоих рассматриваемых слоях. В интервале периодов от  $\sim 3$  до 6 месяцев какие-либо ощутимые квазипериодические процессы в атмосфере отсутствуют.

В тропиках в верхней стратосфере и нижней мезосфере наблюдаются полугодовые осцилляции (ПГО) зонального ветра, которые обусловлены передачей импульса атмосфере от распространяющихся снизу внутренних гравитационных волн (ВГВ) [25, 28]. Тропические ПГО зонального ветра приводят к возмущению всех параметров атмосферы на всех широтах. Полугодовые вариации содержания озона ранее уже наблюдались [14, 29, 30]. Отчетливую

полугодовую особенность рассматриваемых Фурье- и вейвлет-спектров вариаций содержания озона в слое 25–60 км следует связывать с ПГО. Данную особенность можно было бы принять за 2-ю гармонику сильных годовых вариаций содержания озона (см. ниже). Однако слабость полугодовой особенности в спектрах для слоя 0–25 км при наличии там сильных годовых вариаций содержания озона убеждает, что источником этой особенности, по крайней мере, в слое 25–60 км является все же ПГО.

Самой сильной особенностью рассматриваемых Фурье- и вейвлет-спектров вариаций содержания озона ожидаемо является годичная периодичность. Содержание озона испытывает сильные годовые вариации, обусловленные годовыми изменениями как в скоростях фотохимических процессов, так и в системе атмосферных движений.

В тропической нижней и средней стратосфере наблюдаются квазидвухлетние осцилляции (КДО) зонального ветра, которые обусловлены передачей импульса атмосфере от распространяющихся снизу ВГВ и экваториальных волн [25, 31]. Период КДО варьирует в пределах от 22 до 34 месяцев при среднем значении 28 месяцев. Подобно ПГО, КДО зонального ветра в тропиках приводят к возмущению всех параметров атмосферы на всех широтах. Также существует квазидвухлетняя мода в колебаниях солнечной активности [32, 33], которая может влиять на содержание озона выше 25 км за счет вариаций потока солнечного УФ-излучения, как уже обсуждалось выше относительно влияния на озон вращения Солнца с периодом 27 суток. На средних широтах квазидвухлетние вариации температуры существуют в атмосфере от поверхности до нижней термосферы [34]. Квазидвухлетняя периодичность обнаружена в амплитудах колебаний температуры в планетарных волнах в нижней стратосфере средних и высоких широт Северного полушария [35]. Квазидвухлетние вариации содержания озона ранее уже наблюдались [14, 29, 30, 36], включая их регистрацию по данным SBUV [37]. Квазидвухлетняя особенность выявляется в рассматриваемых Фурье- и вейвлет-спектрах вариаций содержания озона для обоих слоев, но особенно она заметна в слое 0–25 км.

Самые длиннопериодные особенности Фурье-спектров вариаций содержания озона следует в основном связывать с квазипериодическим процессом в тропической тропосфере, называемым Эль-Ниньо–Южная осцилляция (ЭНЮО) [38], и с многолетними вариациями солнечной активности [24, 32, 33]. Временные интервалы между обусловленными ЭНЮО возмущениями атмосферы варьируют в широких пределах — от 2 до 7 лет, а в качестве характерного периода ЭНЮО можно принять 40 месяцев. Подобно ПГО и КДО зонального ветра в тропиках, ЭНЮО приводит к возмущению всех параметров атмосферы на всех широтах: например, на средних широтах она проявляется в виде 3.4-летней периодичности

в изменениях температуры атмосферы от поверхности до нижней термосферы [34]. Что касается вариаций солнечной активности, влияющей на озон в основном через изменения потока солнечного УФ-излучения, то это, прежде всего, хорошо известный 11-летний цикл, действие которого проявляется в вариациях всех атмосферных параметров и процессов [39, 40]. Также обнаружена 7–8-летняя мода [33], воздействие которой на атмосферу, по-видимому, подтверждается наблюдением 8-летней периодичности в амплитудах колебаний температуры в планетарных волнах в нижней стратосфере средних и высоких широт Северного полушария [35]. Наблюдаются вариации параметров атмосферы с периодом около 5 лет [34, 41]. Причиной данной периодичности, во-первых, может быть 2-я гармоника 11-летнего цикла солнечной активности [32]. Во-вторых, периодическая фильтрация распространяющихся снизу ВГВ, производимая упомянутой выше КДО зонального ветра, приводит к взаимодействию КДО с экваториальной годовой осцилляцией этого ветра, что формирует в приэкваториальной стратосфере 5-летнюю периодичность скорости ветра [41]. Существует достаточно

много наблюдений многолетних вариаций содержания озона [14, 30, 42], в том числе наблюдений его 11-летних вариаций в стратосфере по данным SBUV [26, 43, 44]. В рассматриваемых Фурье-спектрах в обсуждаемом диапазоне периодов имеются отчетливые особенности, которые можно связывать с указанными выше явлениями. Ожидается, что 11-летний цикл солнечной активности проявляется в вариациях содержания озона в слое 25–60 км сильнее, чем в слое 0–25 км.

#### 4. СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ С МОДЕЛЯМИ И СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МЕЖДУ СОБОЙ

Для обоих слоев осуществлено сравнение Фурье-спектров вариаций содержания озона, полученных по наблюдениям прибором SBUV, с тем же, но полученных расчетами в рамках моделей EMAC и РГГМУ для Санкт-Петербурга и Кируны за тот же интервал времени (рис. 3 и 4). Аналогичное сравнение выполнено для вейвлет-спектров вариаций

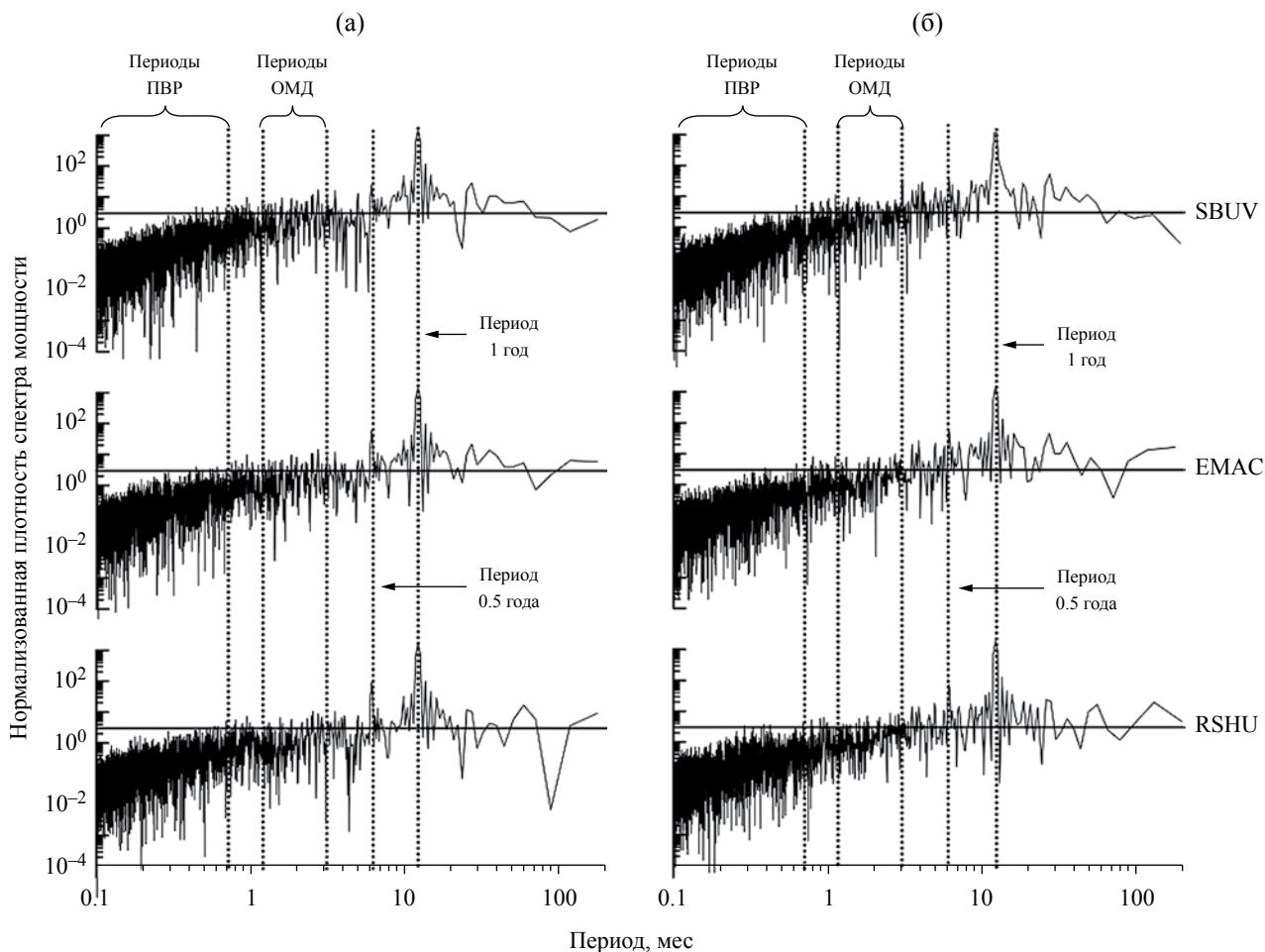


Рис. 3. Фурье-спектры вариаций содержания озона в слое 0–25 км над Санкт-Петербургом (а) и Кируной (б) по данным измерений прибором SBUV и данным моделирования EMAC и РГГМУ (RSHU). Остальные пояснения в подписи к рис. 2.

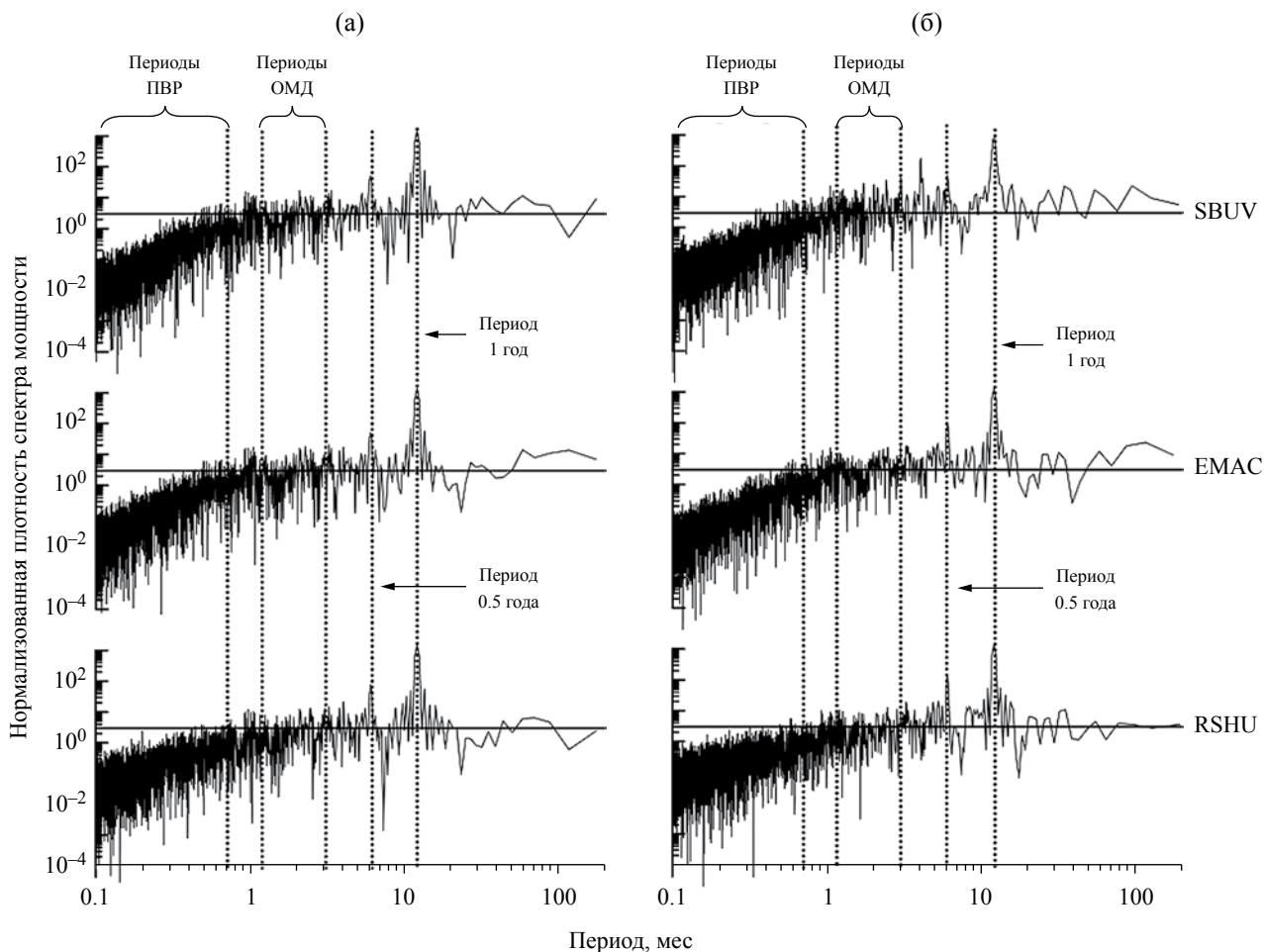


Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для слоя 25–60 км.

содержания озона над Санкт-Петербургом (рис. 2). В целом, спектры, полученные по измерениям и по моделям, хорошо согласуются. Но имеют место также следующие различия как между измерениями и моделями, так и между самими моделями.

1. Фурье-спектры наблюдаемых вариаций содержания озона над Кируной в слое 25–60 км содержат интенсивные гармоники годовых вариаций от 3-й до 7-й (рис. 4б). Эти гармоники, но уже сильно ослабленные, также проявляются в спектрах для слоя 0–25 км (рис. 3б). В то же время указанные гармоники отсутствуют в спектрах по модельным данным (рис. 3б и 4б). Таким образом, данные гармоники в спектрах, полученных по наблюдениям, являются артефактом, обусловленным перерывами в измерениях озона около времени зимнего солнцестояния.

2. 11-летняя периодичность и ПГО, обе формируемые выше 25 км, в Фурье-спектрах проявляются в слое 0–25 км гораздо сильнее в моделях, чем по наблюдениям (рис. 3). Возможное объяснение расхождения в том, что в моделях

завышена скорость переноса озона вниз движениями в стратосфере.

3. Если в слое 25–60 км Фурье-спектры, полученные по модели EMAC, в соответствии с Фурье-спектрами, полученными по наблюдениям, уверенно демонстрируют 11-летнюю периодичность, то по модели РГГМУ она оказывается довольно слабой (рис. 4). Причиной указанного расхождения, например, может быть использование в моделях разных зависимостей УФ солнечного излучения от частоты и (или) различие параметров фотохимических процессов, определяющих возникновение и гибель озона. Чувствительность модельных оценок содержания стратосферного озона к используемым моделям УФ-излучения в разные фазы солнечной активности продемонстрирована в статье [45].

4. Если в области периодов волн Россби от ~ 2 до ~ 30 суток вейвлет-спектры для слоя 25–60 км, полученные по модели EMAC, демонстрируют прекрасное совпадение с тем же, полученным по наблюдениям, то модель РГГМУ показывает не только гораздо более слабое влияние этих волн на

вариации содержания озона, но иногда воздействие волн на озон даже по времени не совпадает с наблюдениями (рис. 2б). В то же время для слоя 0–25 км модель РГГМУ хорошо воспроизводит эффект волн Россби (рис. 2а). Поскольку волны Россби формируются в тропосфере, причиной указанного расхождения, вероятно, является неточное воспроизведение моделью механизма распространения волн Россби в стратосфере.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для периода 2000–2014 гг. проведены исследования временных вариаций содержания озона в двух слоях (0–25 и 25–60 км) для трех пунктов наблюдений в субарктике (Санкт-Петербург, Харрестуа и Кируна) с использованием Фурье- и вейвлет-спектров. Анализировались как спутниковые измерения (аппаратура SBUV), так и результаты моделирования с помощью двух численных моделей (РГГМУ и ЕМАС). По Фурье-спектрам были выявлены периодичности в диапазоне периодов от ~ 10 суток до ~ 10 лет. Вейвлет-спектры уверенно демонстрируют периодичности с периодами от ~ 1 суток до ~ 2 лет. Подробно обсуждена и проанализирована физическая природа зарегистрированных колебаний. Сравнение Фурье- и вейвлет-спектров, полученных по наблюдениям озона, с теми же по модельным данным и аналогичное сравнение самих моделей позволяет сделать следующие выводы:

1) 11-летняя периодичность и ПГО в Фурье-спектрах проявляются в слое 0–25 км гораздо сильнее по модельным данным, чем по наблюдениям, что может объясняться завышением в моделях скорости переноса озона вниз движениями в стратосфере;

2) различия моделей РГГМУ и ЕМАС в слое 25–60 км в представлении 11-летней периодичности могут быть обусловлены использованием разных зависимостей УФ солнечного излучения от частоты и (или) различием параметров фотохимических процессов, определяющих возникновение и гибель озона;

3) в области периодов волн Россби от ~ 2 до ~ 30 суток вейвлет-спектры для слоя 25–60 км для модели РГГМУ сильно отличаются от аналогичных как по спутниковым данным, так и по данным модели ЕМАС. Причиной указанного расхождения может быть неточное воспроизведение моделью РГГМУ механизма распространения волн Россби в стратосфере.

Сбор и анализ данных профинансированы грантом Российского научного фонда № 14-17-00096. Сопоставление с данными модели ЕМАС выполнены при поддержке гранта СПбГУ 11.42.1057.2016.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Solomon S.* Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history // *Rev. Geophys.* 1999. V. 37. № 3. P. 275–316.
2. *James P.M.* A climatology of ozone mini-holes over the Northern hemisphere // *Int. J. Climatol.* 1998. V. 18. P. 1287–1303.
3. *Hommel R., Eichmann K.-U., Aschmann J. et al.* Chemical ozone loss and ozone mini-hole event during the Arctic winter 2010/2011 as observed by SCIAMACHY and GOME-2 // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14. P. 3247–3276.
4. *McKenzie R.L., Connor B.J., Bodeker G.E.* Increased summertime UV observed in New Zealand in response to ozone loss // *Science.* 1999. V. 285. P. 1709–1711.
5. *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.
6. *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.
7. *Jöckel P., Tost H., Pozzer A., Brühl C. et al.* The atmospheric chemistry general circulation model ECHAM5/MESSEy1: consistent simulation of ozone from the surface to the mesosphere // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6. P. 5067–5104.
8. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 2011. V. 137. P. 553–597.
9. *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.
10. *Смышляев С.П., Виролайнен Я.А., Моцаков М.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В.* Межгодовые и сезонные вариации интегрального содержания озона в разных высотных слоях вблизи Санкт-Петербурга по данным наблюдений и численного моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2017. Т. 53. № 3. С. 343–359.
11. *Виролайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Ионоу Д.В., Курнер О., Поберовский А.В., Имхасин Х.* Сопоставление наземных измерений общего содержания O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, HCl и NO<sub>2</sub> с данными численного моделирования // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 52. № 1. С. 64–73.
12. *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.

13. *Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S.* Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series // *Nonlinear Proc. Geophys.* 2004. V. 11. P. 561–566.
14. *Вишератин К.Н., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Семенов В.К., Синяков В.П., Сорокина Л.И.* Спектрально-временная структура вариаций общего содержания озона в атмосфере центральной части Евразии // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2006. Т. 42. № 2. С. 205–223.
15. *Madden R.A.* Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere – an update // *Tellus.* 2007. V. 59A. P. 571–590.
16. *Nogués-Paegle J., Mo K.C., Callahan K.P.* Lower stratosphere waves during 1986–1989 Southern springs // *Tellus.* 1992. V. 44B. P. 390–408.
17. *Azeem S.M.I., Palo S.E., Wu D.L., Froidevaux L.* Observations of the 2-day wave in UARS MLS temperature and ozone measurements // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. P. 3147–3150.
18. *Belova A., Kirkwood S., Murtagh D.* Planetary waves in ozone and temperature in the Northern hemisphere winters of 2002/2003 and early 2005 // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1189–1206.
19. *Studer S., Hocke K., Kampfer N.* Intraseasonal oscillations of stratospheric ozone above Switzerland // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. V. 74. P. 189–198.
20. *Demissie T.D., Kleinknecht N.H., Hibbins R.E., Espy P.J., Straub C.* Quasi-16-day oscillations observed in middle atmospheric ozone and temperature in Antarctica // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. P. 1279–1284.
21. *Prata A.J.* Travelling waves in Nimbus-7 SBUV ozone measurements: Observations and theory // *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 1990. V. 116. P. 1091–1122.
22. *Randel W.J.* Global normal-mode Rossby waves observed in stratosphere ozone data // *J. Atmos. Sci.* 1993. V. 50. P. 406–420.
23. *Швед Г.М., Ермоленко С.И., Карпова Н.В., Вендт З., Якоби К.* Регистрация глобальных осцилляций атмосферы сейсмическими приборами // *Физика Земли.* 2013. № 2. С. 131–142.
24. *Brasseur G.P., Solomon S.* *Aeronomy of the Middle Atmosphere. Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere.* Third revised and enlarged edition. Dordrecht: Springer, 2005. 644 p.
25. *Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B.* *Middle atmosphere dynamics.* Orlando: Academic Press, 1987. 489 p.
26. *Chandra S., McPeters R.D.* The solar cycle variation of ozone in the stratosphere inferred from Nimbus 7 and NOAA 11 satellites // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № D10. P. 20665–20671.
27. *Zhang C.* Madden-Julian oscillation // *Rev. Geophys.* 2005. V. 43. № RG2003, doi:10.1029/2004RG000158.
28. *Ern M., Preusse P., Riese M.* Driving of the SAO by gravity waves as observed from satellite // *Ann. Geophys.* 2015. V. 33. P. 483–504.
29. *Huang F.T., Mayr H.G., Reber C.A., Russell III J.M., Mlynczak M.G., Mengel J.G.* Ozone quasi-biennial oscillations (QBO), semiannual oscillations (SAO), and correlations with temperature in mesosphere, lower thermosphere, and stratosphere, based on measurements from SABER on TIMED and MLS on UARS // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A01316, doi:10.1029/2007JA012634.
30. *Moreira L., Hocke K., Navas-Guzmán F., Eckert E., von Clarmann T., Kämpfer N.* The natural oscillations in stratospheric ozone observed by the GROMOS microwave radiometer at the NDACC station Bern // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 10455–10467.
31. *Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J. et al.* The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. P. 179–229.
32. *Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю.* Излучение верхней атмосферы – индикатор ее структуры и динамики. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.
33. *Paluš M., Novotná D.* Phase-coherent oscillatory modes in solar and geomagnetic activity and climate variability // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 923–930.
34. *Offermann D., Goussev O., Kalicinsky Ch., Koppmann R., Matthes K., Schmidt H., Steinbrecht W., Wintel J.* A case study of multi-annual temperature oscillations in the atmosphere: Middle Europe // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 135. P. 1–11.
35. *Powell A.M., Xu J.* Possible solar forcing of interannual and decadal stratospheric planetary wave variability in the northern hemisphere: An observational study // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 825–838.
36. *Вишератин К.Н.* Квазидесятилетние вариации общего содержания озона, ветра, температуры и геопотенциальной высоты над станцией Ароза, Швейцария // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2016. Т. 52. № 1. С. 74–82.
37. *Randel W.J., Wu F.* Climatology of stratospheric ozone based on SBUV and SBUV/2 data: 1978–1994. Tech. Note NCAR/TN-412-STR. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1995. 137 p.
38. *Neelin J.D., Battisti D.S., Hirst A.C., Jin F.-F., Wakata Y., Yamagata T., Zebiak S.E.* ENSO theory // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103C. P. 14261–14290.
39. *Frame T.H.A., Gray L.J.* The 11-Yr Solar Cycle in ERA-40 Data: An Update to 2008 // *J. Climate.* 2011. V. 23. P. 2213–2222.
40. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Блакитная П.А., Лемищенко 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.



41. *Mayr H.G., Lee J.N.* Downward propagating Equatorial Annual Oscillation and QBO generated multi-year oscillations in stratospheric NCEP reanalysis data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2016. V. 138–139. P. 1–8.
42. *Maycock A.C., Matthes K., Tegtmeier S., Thiéblemont R., Hood L.* The representation of solar cycle signals in stratospheric ozone – Pt 1: A comparison of recently updated satellite observations // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16. P. 10021–10043.
43. *McCormac J.P., Hood L.L.* Apparent solar cycle variations of upper stratospheric ozone and temperature: Latitude and seasonal dependences // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № D15. P. 20933–20944.
44. *Вишератин К.Н.* Пространственно-временные вариации фазы квазидесятилетних колебаний общего содержания озона // *Исслед. Земли из космоса.* 2016. № 6. С. 9–18.
45. *Bolduc C., Bourqui M.S., Charbonneau P.* A comparison of stratospheric photochemical response to different reconstructions of solar ultraviolet radiative variability // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 132. P. 22–32.

## Ozone Temporal Variability in the Subarctic Region: Comparison of Satellite Measurements with Numerical Simulations

© 2018 G. M. Shved<sup>1,\*</sup>, Ya. A. Virolainen<sup>1</sup>, Yu. M. Timofeyev<sup>1</sup>, S. I. Ermolenko<sup>1</sup>, S. P. Smyshlyaev<sup>2</sup>, M. A. Motsakov<sup>2</sup>, and O. Kirner<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University, University emb.  
7/9, St. Petersburg, 199034, Russia*

<sup>2</sup>*Russian State Hydrometeorological University  
Malookhtinsky 98, St. Petersburg, 195196, Russia*

<sup>3</sup>*Steinbuch Centre for Computing, Karlsruhe Institute of Technology  
Kaiserstrasse 12, 76131 Karlsruhe Germany*

*\*E-mail: g.shved@spbu.ru*

Fourier and wavelet spectra of time series for total ozone abundance in the atmospheric 0–25 and 25–60 km layers were analyzed for the SBUV satellite observations and numerical simulations based on the RSHU and EMAC models. The datasets for three subarctic locations (St. Petersburg, Harestua, and Kiruna) were used for the period of 2000 through 2014. The Fourier and wavelet spectra show periodicities in the range from ~10 days to ~10 years and from ~1 day to ~2 years, respectively. In general, the comparison of obtained spectra demonstrates agreement between observational and modeled datasets. However, there are some differences both between measurements and model and between models themselves. The differences primarily concern to the Rossby wave period region and 11-year, and semi-annual periodicities. Possible reasons for the discrepancies between models and measurements are pointed out.

**Keywords:** Atmospheric composition, ozone variability, satellite measurements, atmospheric composition models, the Subarctic.