

УДК 537.876+551.51

МНОГОЛЕТНИЕ ГЛОБАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВАРИАЦИЙ РАДИОРЕФРАКЦИИ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ GPS-СПУТНИКА CHAMP

*Н. М. Гаврилов **, *Р. О. Мануйлова*

Санкт-Петербургский госуниверситет, г. Санкт-Петербург, Россия

Получены средние глобальные распределения дисперсий мезомасштабных вариаций индекса радиорефракции (показателя преломления) атмосферы на высотах 5–35 км по данным радиозатменных экспериментов за время работы низкоорбитального GPS-спутника CHAMP с 2001 по 2009 годы. Фильтрация вертикальных профилей индекса радиорефракции позволяет определить дисперсии вариаций с вертикальными масштабами, меньшими 8 км. Широко-временные распределения среднезональных дисперсий индекса обнаруживают существенные междугодовые вариации на разных высотах. Исследованы сезонные изменения дисперсий радиорефракции. Обнаружены проявления квазидвухлетних колебаний в низких широтах. Причиной дисперсии индекса радиорефракции могут быть акустико-гравитационные волны и турбулентные и конвективные движения в атмосфере.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы для анализа атмосферных процессов широко применяется спутниковое дистанционное зондирование с использованием радиоволн, что позволяет получить глобальную информацию о динамических структурах планетарного масштаба и мезомасштабных возмущениях параметров атмосферы. Благодаря интенсивным экспериментальным и теоретическим исследованиям и спутниковым данным, наши знания о вариациях показателя преломления под воздействием атмосферной конвекции, волн и турбулентности значительно увеличились.

Глобальная позиционирующая система (GPS) с момента её создания использовалась для изучения параметров атмосферы. Спутники системы GPS обращаются по круговым орбитам вокруг Земли за время около 12 ч на высотах порядка 20 000 км, и радиосигналы этих спутников регистрируют приёмники, расположенные на поверхности Земли или на низкоорбитальных спутниках. При распространении сантиметровых радиоволн через атмосферу их траектории искривляются и скорость их распространения уменьшается. Измерение вариаций фаз радиосигналов, принятых от нескольких спутников GPS-системы, позволяет определить координаты приёмника и вертикальные профили показателя преломления атмосферы для радиоволн.

Первые эксперименты по радиозатменному зондированию атмосферы радиосигналами от навигационной системы GPS проводились с помощью приёмника, установленного на спутнике «Microlab-1» в 1995–1997 годах [1, 2]. Лимбовые фазовые измерения позволили получить вертикальные профили показателя преломления атмосферного воздуха. В работе [3] показано, что изменения фаз радиосигналов пропорциональны изменениям индекса радиорефракции $N_r = (n - 1) \cdot 10^6$, проинтегрированному вдоль радиолуча (здесь n — показатель преломления). Из данных GPS-спутника «Microlab-1» была получена обширная информация о мезомасштабных изменениях параметров атмосферы, причиной которых могут быть динамические и волновые процессы [4–7]. Исследования мезомасштабных вариаций с помощью радиозатменных GPS-экспериментов были продолжены со спутника CHAMP, запущенного в апреле 2001 года, и позднее со спутников космической группы COSMIC, выведенных в космос в 2006 году [8–13].

* gavrilov@pobox.spbu.ru

В работах [6, 7] относительные вариации индекса радиорефракции $\delta N_r/N_r$ по данным спутникового эксперимента GPS/MET изучались как индикатор мезомасштабной изменчивости на всех высотах в атмосфере. Здесь δN_r — дисперсия мезомасштабной компоненты, полученная путём фильтрации вертикальных профилей $N_r(z)$, измеряемых с GPS-спутника. В данной работе мы исследуем распределения дисперсий индекса радиорефракции по высоте, широте и долготе на основе данных о преломлении GPS-радиосигналов, зарегистрировавшихся на борту низкоорбитального спутника CHAMP в 2001–2009 годы. Авторы работ [14–18] анализировали широтно-долготные структуры мезомасштабных вариаций в стратосфере по данным измерений со спутника CHAMP за более короткие интервалы времени. Они обнаружили существенные неоднородности мезомасштабных дисперсий. Поэтому для изучения стабильных климатологических особенностей высотно-широтных распределений мезомасштабных дисперсий в атмосфере требуется большое количество данных.

В настоящем исследовании мы проанализировали более чем 250 000 вертикальных профилей атмосферного индекса радиорефракции, измеренных со спутника CHAMP за время его работы (2001–2009 годы), которые получены из базы данных Центра геофизических исследований в Потсдаме, Германия. Определены средние за указанные годы широтно-высотные и широтно-долготные распределения дисперсий мезомасштабных вариаций индекса радиорефракции в атмосфере. Исследована корреляция мезомасштабной изменчивости с устойчивостью атмосферы.

1. МЕТОД АНАЛИЗА ДАННЫХ

В настоящей работе мы используем данные 5-ой версии определения параметров атмосферы по данным спутника CHAMP [19]. Определение параметров атмосферы по данным GPS-спутников в Центре геофизических исследований в Потсдаме, Германия, начиналось с коррекции расхождений спутниковых часов с помощью метода двойных разностей [20]. Углы преломления радиолучей на двух частотах определялись путём дифференцирования по времени избыточного набега фазы в атмосфере после специальной фильтрации [21]. Коррекция вклада ионосферы осуществлялась с помощью линейной комбинации углов преломления радиолучей на двух частотах. Для устранения последствия многолучевой интерференции радиоволн на высотах менее 15 км использовался метод полной спектральной инверсии [22]. Вертикальные профили радиорефракции в атмосфере определялись из исправленных вертикальных профилей угла преломления, измеренных на спутнике CHAMP, и имели шаг по высоте 0,2 км. Более подробно используемые методы определения параметров атмосферы описаны в работе [22].

В атмосфере индекс рефракции N_r уменьшается с высотой пропорционально падению плотности. Часто при анализе данных спутников GPS вводится так называемая «сухая температура» $T_{\text{dry}} = Cp[\text{мм.рт.ст.}]/N_r$, где p — давление, а константа $C = 77,6$ К/миллибар. Сухая температура обеспечивает хорошую оценку атмосферной температуры на высотах более 5÷10 км. На более низких высотах на показатель преломления может влиять влажность, поэтому сухая температура может отличаться от температуры окружающего воздуха. Выше 30÷35 км могут возникать существенные погрешности из-за неполного исключения ионосферного вклада [3]. Динамические процессы в атмосфере обуславливают вариации давления δp , температуры δT и других параметров. Для мелкомасштабной турбулентности и низкочастотных коротких акустико-гравитационных волн обычно выполняется соотношение $|\delta p/p| \ll |\delta T/T|$ и можно показать, что $\delta T_{\text{dry}}/T_{\text{dry}} \approx \delta N_r/N_r$. Авторы работ [6, 7], используя данные эксперимента GPS/MET, показали хорошую выполнимость этого соотношения. Таким образом, относительное отклонение $\delta T_{\text{dry}}/T_{\text{dry}}$ может использоваться (наряду с $\delta N_r/N_r$) для оценки колебаний индекса рефракции в атмосфере.

В работе [3] показано, что исследование мезомасштабной изменчивости атмосферных харак-

теристик требует уменьшения вертикальной неоднородности путём фильтрации крупномасштабных компонент. Для этого используются различные цифровые фильтры (см., например, работы [12, 13, 23, 24]). Численные эксперименты показывают, что после некоторой подгонки параметров различные типы цифровых фильтров дают почти эквивалентные результаты. В данном исследовании мы используем цифровые фильтры, основанные на полиномиальной аппроксимации [6, 7]. Для каждой высоты спутниковых измерений z_i мы вычисляем сглаженные значения величины $\ln N_{r0}(z_i)$ или $T_0(z_i)$, используя аппроксимацию методом наименьших квадратов соответствующих вертикальных профилей $\ln N_r(z)$ или $T_{dry}(z)$ полиномами второго порядка внутри скользящих высотных интервалов с толщиной Δz с центрами на высотах z_i . Затем мезомасштабные вариации индекса радиорефракции атмосферы оцениваются как относительные дисперсии отклонений от этих сглаженных значений: $\delta N_r/N_{r0}$ или $\delta T/T_0$. В данном исследовании мы использовали толщины слоёв $\Delta z \approx 5 \div 10$ км. Модельные расчёты показывают, что описанная процедура эквивалентна цифровому фильтру, пропускающему спектральные гармоники, которые отвечают вертикальным длинам волн $\lambda_z < 4 \div 8$ км при $\Delta z \approx 5 \div 10$ км, соответственно.

При описанной полиномиальной фильтрации используются сравнительно тонкие слои с малыми Δz , не требуется предположения о вертикальной однородности, требуется мало компьютерного времени и можно обрабатывать огромное количество вертикальных профилей неэквидистантных по высоте данных. Однако эта фильтрация может завышать амплитуды возмущений вблизи очень острой тропопаузы [12, 13, 23, 24]. Исследования в работах [13, 24] и наши численные эксперименты показали, что завышения амплитуды могут возникнуть только на удалениях меньших, чем $\pm 3 \div 5$ км от тропопаузы, и только тогда, когда изменения вертикального градиента температуры в области тропопаузы достаточно велики. При нашей квадратичной полиномиальной фильтрации используются высотные слои с толщиной $\Delta z \approx 5 \div 10$ км. Таким образом, тропопауза не влияет на результаты нашего анализа на удалениях от неё, превышающих $\Delta z/2 \approx 3 \div 5$ км. Дополнительной мерой предосторожности против артефактов за счёт тропопаузы является исключение из анализа данных, для которых разница между вертикальными градиентами температуры в верхней и нижней частях аппроксимирующих слоёв превышала 6 К/км. В каждом узле вертикального профиля индекса радиорефракции, измеренного спутником CHAMP, вычисляются значения квадратичного тренда и относительные отклонения от него. Затем для заданных высот, географических регионов и для различных месяцев всего интервала работы спутника CHAMP в 2001–2009 годах вычисляются дисперсии указанных отклонений индекса радиорефракции.

Авторы работ [25–27] показали, что в областях роста угла рефракции с высотой становится возможным наложение радиолучей, проходящих в точку наблюдения по различным траекториям. Это может создать ложные вариации измеряемых параметров, не связанные с атмосферными процессами. Такие эффекты многолучевого распространения радиоволн часто наблюдаются в нижней атмосфере. В работе [25] для значений параметров атмосферы, получаемых из данных GPS-спутников, оценены ошибки, возникающие вследствие многолучевого распространения радиоволн. Описанный выше анализ данных CHAMP включает в себя полную спектральную инверсию [28], которая уменьшает влияние многолучевого распространения радиоволн. Однако в районах больших неоднородностей углов преломления могут оставаться значительные пики на профилях $N_r(z)$, которые могут быть интерпретированы как ложные возмущения параметров атмосферы. Чтобы устранить такие остаточные эффекты многолучевого распространения радиоволн, мы исключили из рассмотрения все данные из слоёв с толщиной 1 км выше и ниже уровней, где локально $|\mathrm{d} \ln(N_r)/\mathrm{d}z - \mathrm{d} \ln(N_{r0})/\mathrm{d}z| > 0,01 \text{ км}^{-1}$. Статистический анализ более чем 250 000 профилей $N_r(z)$, полученных со спутника CHAMP, показал, что такие сильные различия в локальных и сглаженных градиентах наблюдаются только в нескольких процентах случаев и не могут повлиять на средние мезомасштабные дисперсии, полученные в данном исследовании.

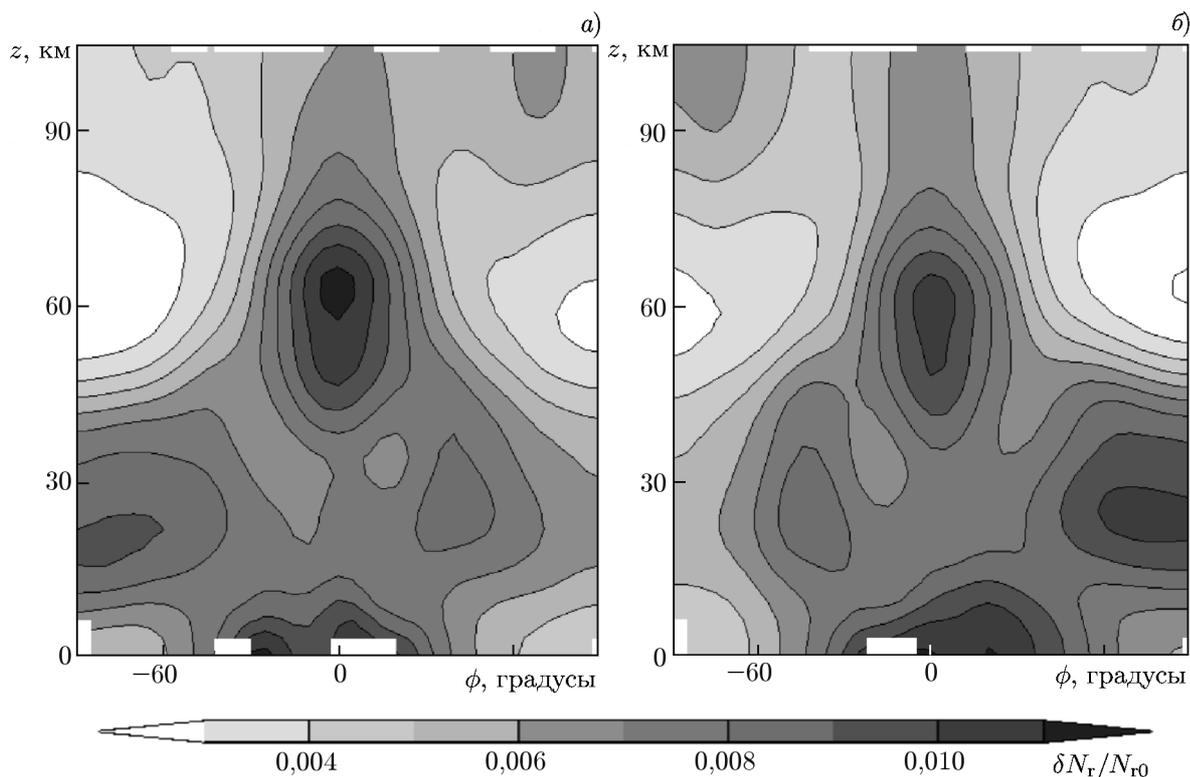


Рис. 1. Дисперсия относительных мезомасштабных возмущений индекса радиорефракции $\delta N_r/N_{r0}$, усреднённая по долготе и времени за весь срок радиозатменных измерений на GPS-спутнике СНАМР в 2001–2009 годах для декабря–февраля (а) и для мая–сентября (б)

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

С помощью методов, описанных выше, были обработаны данные измерений индекса радиорефракции с GPS-спутника СНАМР с апреля 2001 года по апрель 2009 года. Для анализа высотно-широтной структуры среднезональных характеристик мы рассчитали дисперсии мезомасштабных вариаций показателя преломления, усреднённые за весь период наблюдений со спутника СНАМР в 2001–2009 годах. Сравнение результатов применения различных вертикальных фильтров с толщиной $\Delta z = 5$ км и $\Delta z = 10$ км дают почти одинаковые распределения анализируемых характеристик, поэтому в данной работе мы представляем результаты только для $\Delta z = 10$ км.

Полученные мезомасштабные дисперсии приведены на рис. 1 для данных, усреднённых за месяцы, соответствующие зиме (с декабря по февраль, панель а) и лету (с мая по сентябрь, панель б) северного полушария за все анализируемые годы. Рисунок 1 показывает существование главных максимумов мезомасштабных дисперсий индекса радиорефракции на высотах $15 \div 25$ км в экваториальных широтах, которые могут быть связаны с волновыми движениями и тропической глубокой конвекцией (см. ниже). На рис. 1 можно также увидеть увеличенные дисперсии на высотах $5 \div 10$ км, которые совпадают с областями тропо-стратосферных струйных течений (см. иллюстрации в работе [8]), районами выше тропопаузы, а также могут быть вызваны другими источниками волн и турбулентности в атмосфере. Сравнение панелей (а) и (б) на рис. 1 позволяет проследить сезонные изменения мезомасштабных дисперсий, которые на высотах $5 \div 15$ км больше в летнем полушарии. На высотах более 20 км дисперсии больше в зимние сезоны северного и южного полушарий. Это, по-видимому, отражает сезонную изменчивость источников

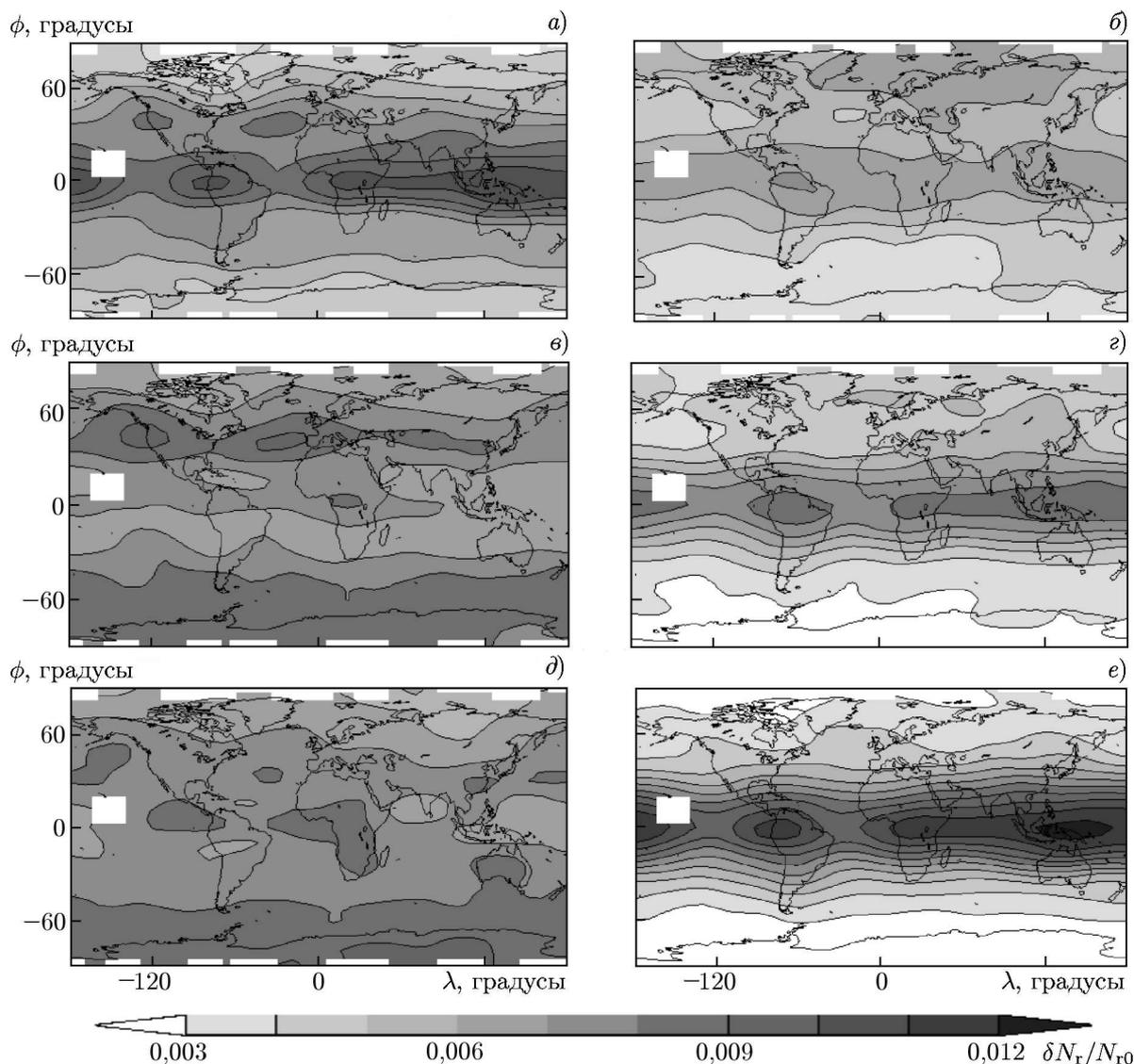


Рис. 2. Широтно-долготные распределения дисперсий относительных мезомасштабных возмущений радиорефракции для декабря–февраля, усреднённые за 2001–2009 годы по данным GPS-спутника CHAMP на высотах $z = 15$ км (а), 30 км (б), 10 км (в), 25 км (з), 5 км (д) и 20 км (е)

мезомасштабных акустико-гравитационных волн и фоновых полей в атмосфере, влияющих на распространение этих волн. Распределения на рис. 1 похожи на аналогичные распределения, полученные ранее по данным эксперимента GPS/Microlab-1 в 1995–1997 годах [6, 7] и из ранних данных спутника CHAMP [17]. Аналогичное распределение для потенциальной энергии атмосферных акустико-гравитационных волн выше 5 км в декабре 2006 года было получено в работе [8] по данным спутников COSMIC. Это указывает на хорошую воспроизводимость и стабильность высотно-широтных среднезональных мезомасштабных распределений индекса радиорефракции в различных спутниковых экспериментах и в разные годы. Такая стабильность результатов может быть доказательством того, что распределения, представленные на рис. 1, не связаны со случайными ошибками измерений, а отражают реальные вариации параметров атмосферы.

Рисунки 2 и 3 представляют широтно-долготные распределения мезомасштабных дисперсий

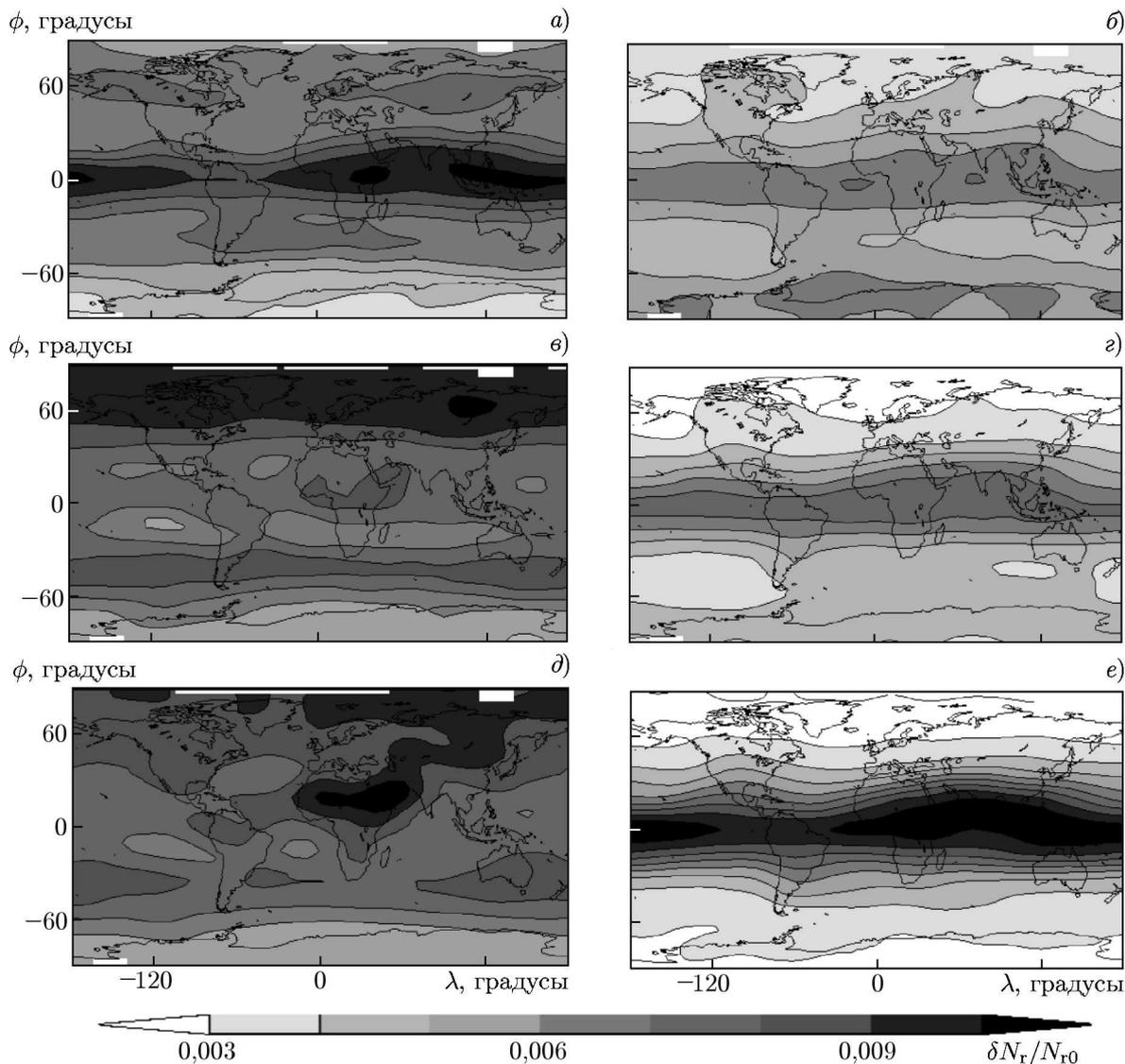


Рис. 3. То же, что на рис. 2, но для мая–сентября 2001–2009 годов

атмосферного индекса радиорефракции в различных высотных слоях для зимних и летних месяцев северного полушария соответственно. На высотах 15÷30 км влажность низка, поэтому дисперсии радиорефракции отражают изменчивость температуры и плотности атмосферы. На меньших высотах дополнительная изменчивость может возникнуть из-за вариаций концентрации водяного пара.

Причинами изменений показателя преломления могут быть динамические процессы, которые создают неоднородности в распределении атмосферных параметров. Таким образом, дисперсии, представленные на рис. 2 и 3, могут показывать распределения интенсивностей мезо- и мелкомасштабных динамических вариаций в фиксированных высотных слоях. Эти вариации могут вызываться мезометеорологическими и конвективными процессами, а также атмосферными акустико-гравитационными волнами и турбулентностью. В тропосфере обычно амплитуды этих волн малы и мезомасштабная турбулентность может вносить значительный вклад в вариации индекса радиорефракции. С ростом высоты амплитуды волн увеличиваются и они дают больший

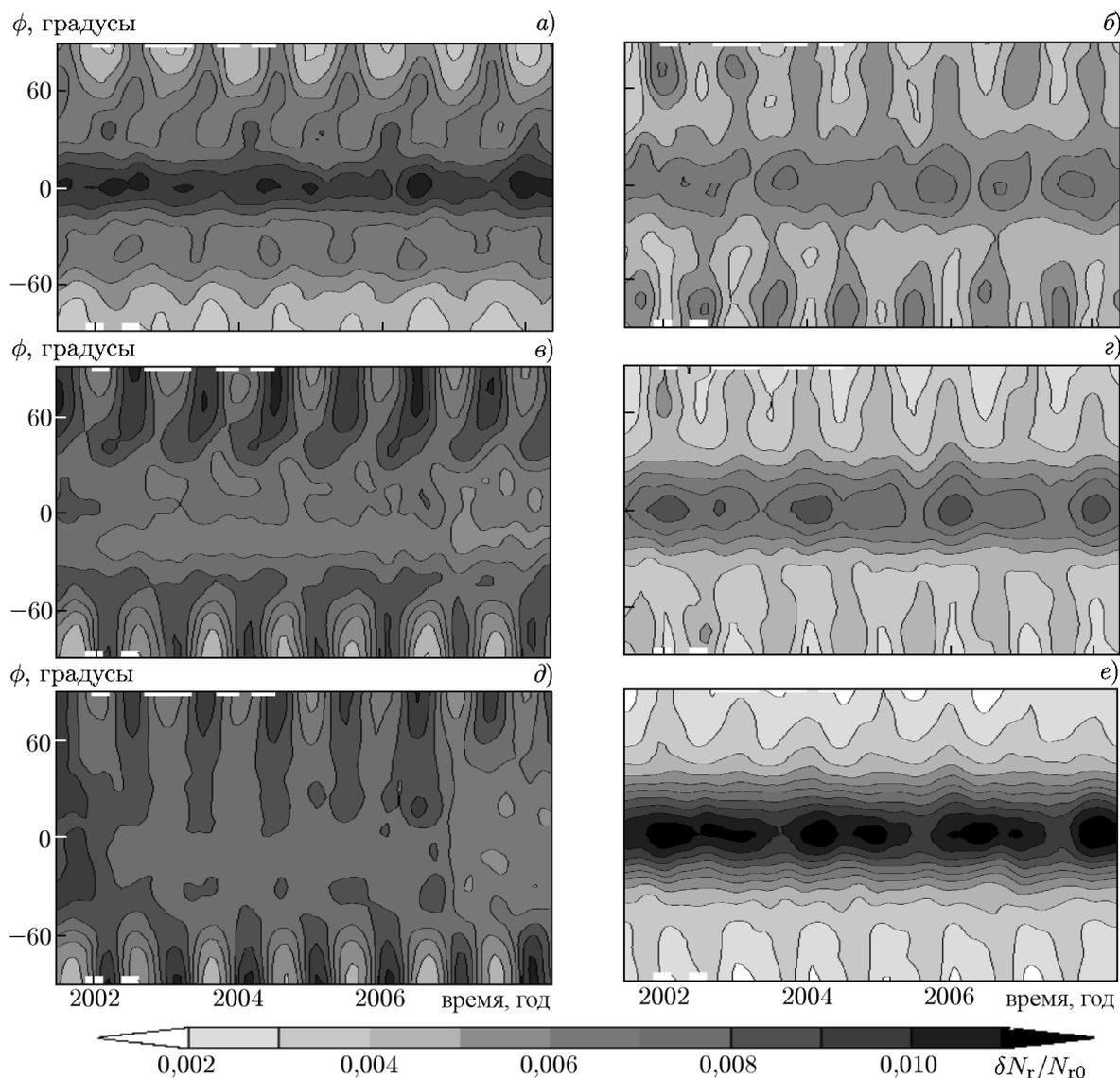


Рис. 4. Широтно-временные вариации среднезональных относительных дисперсий мезомасштабных вариаций радиорефракции на высотах $z = 15$ км (а), 30 км (б), 10 км (в), 25 км (г), 5 км (д) и 20 км (е)

вклад в мезомасштабную изменчивость показателя преломления.

Как видно из рис. 2, в средних широтах на высотах ниже 10 км средние за декабрь–февраль 2001–2009 годов дисперсии радиорефракции имеют максимумы, которые могут отражать конвективную активность. На высотах около 10 км эти максимальные значения коррелируют с расположением тропосферных струйных течений, имеющих максимумы интенсивности на высотах $10 \div 12$ км (см. иллюстрации в работе [8]). На высотах $15 \div 25$ км и широтах от 20° ю. ш. до 20° с. ш. максимумы на рис. 2 могут быть связаны с конвективными и волновыми процессами в экваториальной области (см. ниже). На рис. 3 представлено то же, что на рис. 2, но для месяцев с мая по сентябрь. Главное различие рис. 2 и 3 — это сезонные изменения на высотах более 20 км, где дисперсии мезомасштабной изменчивости больше в зимние сезоны каждого полушария.

Указанные сезонные колебания проявляются яснее на рис. 4, где показаны временные вариации

ции среднезональных дисперсий на различных широтах в разных высотных слоях. На нём можно видеть годовые вариации дисперсий индекса радиорефракции атмосферы на средних и высоких широтах. Ниже 15 км дисперсии максимальны на широтах выше, чем $40^\circ \div 50^\circ$ в северном и южном полушариях в соответствующие этим полушариям летние сезоны. В стратосфере на высотах 25 ÷ 30 км, как показывает рис. 4, максимумы дисперсии наблюдаются в зимние сезоны каждого полушария. В экваториальной области выше 15 км рис. 4 показывает квазидвухлетние колебания с максимумами дисперсий в зимние сезоны 2002, 2004, 2006 и 2008 годов.

Мелко- и мезомасштабные движения зависят от частоты Брента—Вяйсяля, которая определяет устойчивость вертикальных профилей температуры в атмосфере. Для лучшей интерпретации вышеописанных наблюдаемых распределений мезомасштабных дисперсий атмосферного индекса радиорефракции мы использовали сглаженные значения температуры $T_0(z)$ (см. раздел 2) и рассчитали квадраты частоты Брента—Вяйсяля $N^2 = g(dT_0/dz + \gamma_a)/T_0$, где γ_a — сухоадиабатический градиент температуры. Рисунок 5 показывает изменения величины N^2 .

Сравнение рис. 4 и 5 показывает наличие положительных корреляций между дисперсиями мезомасштабных вариаций индекса радиорефракции и частоты Брента—Вяйсяля на высотах 5 ÷ 15 км. В тропосфере на средних и высоких широтах обоих полушарий N^2 имеет максимумы в соответствующие летние сезоны (см. рис. 5), которым отвечают максимумы мезомасштабных дисперсий на рис. 4. В стратосфере выше 20 км эти максимумы N^2 смещаются в зимние сезоны каждого полушария аналогично соответствующим максимумам дисперсий на рис. 4. В экваториальной области на высотах около 20 км на рис. 5 можно увидеть квазидвухлетние колебания N^2 с локальными максимумами в зимние сезоны 2002, 2004, 2006 и 2008 годов. Эти максимумы хорошо соответствуют максимумам квазидвухлетних колебаний дисперсий радиорефракции на рис. 4.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Авторы работы [12] использовали данные спутниковой системы COSMIC за период с декабря 2006 года по февраль 2007 года и оценили параметры акустико-гравитационных волн на высотах 17 ÷ 23 км. Они получили широтно-долготные распределения амплитуд колебаний температуры под действием акустико-гравитационных волн, которые похожи на распределения, представленные на рис. 2 для высот 20 ÷ 25 км. Полученные этими авторами распределения более изменчивы из-за более короткого интервала наблюдений, но имеют те же максимумы над Южной Америкой, Африкой и Тихим океаном, как и распределения на рис. 2 на высоте 20 км. Аналогичные области повышенной мезомасштабной изменчивости в экваториальной области были обнаружены в работе [9]. В указанных исследованиях использовались совершенно разные методы фильтрации искусственных возмущений, вызванных тропопаузой (см. раздел 2), которые были основаны на анализе горизонтальной структуры фоновой температуры и на использовании различных цифровых фильтров. Таким образом, сходство их результатов с результатами, представленными на рис. 2, может служить свидетельством того, что наблюдаемые максимумы мезомасштабной изменчивости радиорефракции на высотах 20 ÷ 25 км не являются артефактами аппроксимации тропопаузы или метода фильтрации данных, но отражают реальную мезомасштабную изменчивость, существующую в средней атмосфере.

Теория акустико-гравитационных волн и турбулентности в атмосфере даёт связь между дисперсиями вариаций температуры $|\delta T/T|$ и горизонтальной скорости $|\delta V|$, имеющую вид $|\delta T/T| = N|\delta V|/g$. Поэтому при одинаковых $|\delta V|$ относительные вариации температуры должны быть больше в областях с большей частотой Брента—Вяйсяля N . Кроме того, мезомасштабные атмосферные гравитационные волны являются вертикально распространяющимися на частотах $\omega <$

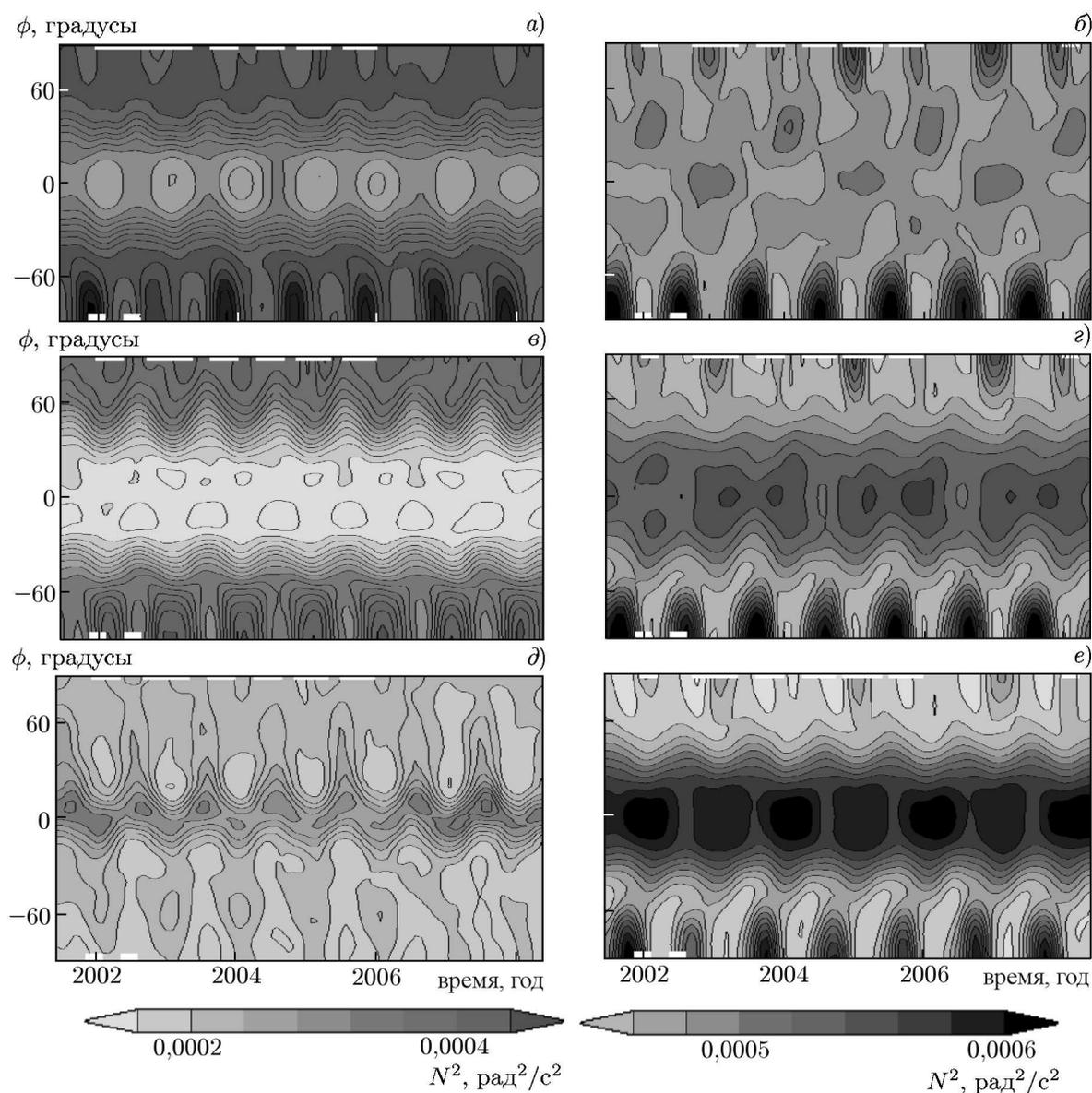


Рис. 5. Широтно-временные вариации квадрата частоты Брента—Вяйсяля N^2 на высотах $z = 15$ км (а), 30 км (б), 10 км (в), 25 км (г), 5 км (д) и 20 км (е)

$< N$ и захваченными при $\omega > N$. Таким образом, увеличение частоты N приводит к расширению спектра частот распространяющихся в атмосфере гравитационных волн. Обе причины могут обуславливать вклад в наблюдаемую на рис. 4 и 5 положительную корреляцию между дисперсиями мезомасштабных вариаций индекса радиорефракции и N^2 .

Главные максимумы мезомасштабных дисперсий индекса радиорефракции на рис. 1 наблюдаются на высотах около 20 км вблизи экватора. Аналогичные максимумы для потенциальной энергии акустико-гравитационных волн $E_p = |\delta T/T|^2 g^2 / (2N^2)$ были зарегистрированы в этих областях по данным спутников CHAMP [16] и COSMIC [8], причём были обнаружены увеличения не только амплитуд вариаций температуры, но и амплитуд возмущений скорости. Это может быть вызвано увеличением частоты Брента—Вяйсяля выше тропопаузы. Численное моделирование и эксперименты на японском МСТ-радаре [29] показали, что резкое увеличение

частоты Брента—Вяйсяля может привести к соответствующему увеличению амплитуд атмосферных акустико-гравитационных волн, распространяющихся снизу. Оценки высоты тропопаузы в $15 \div 17$ км вблизи экватора [8] показывают, что области повышенных мезомасштабных возмущений индекса радиорефракции расположены на несколько километров выше тропопаузы. Для таких высот тропопаузы при численном моделировании распространения акустико-гравитационных волн в работе [29] было найдено, что их амплитуды максимальны на высотах около 20 км, что хорошо согласуется с расположением экваториальных максимумов на рис. 1. Те же численные эксперименты показали, что резкое увеличение акустико-гравитационных волн выше тропопаузы может привести к их неустойчивости и генерации мелкомасштабной турбулентности, которые также могут способствовать наблюдаемой изменчивости атмосферных параметров.

Авторы работы [16] исследовали потенциальную энергию акустико-гравитационных волн на высотах $15 \div 35$ км по данным спутника CHAMP за 2001–2006 годы. Они обнаружили двухлетние колебания с максимумами потенциальной энергии в 2002, 2004 и 2006 годах, аналогичные представленным на рис. 4. На высотах $30 \div 35$ км в работе [16] найдены сезонные колебания потенциальной энергии с зимними максимумами в обоих полушариях, аналогичными максимумам на рис. 4 на высоте 40 км. Поскольку потенциальная энергия отражает интенсивность акустико-гравитационных волн, указанные особенности вариаций индекса радиорефракции на рис. 4 выше 15 км можно объяснить изменениями волновых источников и условий распространения мезомасштабных волн в разные годы и сезоны в средней атмосфере.

В работе [12] были сделаны оценки вертикальных потоков импульса, создаваемых длинными инерционно-гравитационными волнами. Эти потоки имеют максимумы над экваториальной Южной Америкой, Африкой и Скандинавией (где располагаются локальные максимумы дисперсий радиорефракции на высоте 25 км, см. рис. 2). Таким образом, области с повышенной возмущённостью радиорефракции могут рассматриваться в качестве источников акустико-гравитационных волн, распространяющихся в средней атмосфере.

В работе [17] было изучено распределение топографии вдоль экватора и обнаружено, что максимумы мезомасштабных дисперсий радиорефракции на рис. 2 на высотах $20 \div 25$ км расположены над горными районами Южной Америки, Африки и Юго-Восточной Азии. Наиболее протяжённые горные системы находятся в Африке, наименее протяжённые — в Юго-Восточной Азии. Авторы работы [9] использовали уходящую длинноволновую радиацию (УДР) как индикатор наличия глубокой конвекции в экваториальной зоне. В декабре–феврале 2007 года они обнаружили три максимума УДР, совпадающих с максимумами дисперсий радиорефракции, представленных на рис. 4 на высотах $20 \div 25$ км. Таким образом, внутренние мезомасштабные акустико-гравитационные волны, распространяющиеся в средней атмосфере от орографических и конвективных источников, а также усиление волн выше тропопаузы из-за резкого увеличения частоты Брента—Вяйсяля могут создавать устойчивые максимумы мезомасштабной изменчивости радиорефракции на высотах $20 \div 25$ км над экватором.

В работе [30] были проанализированы мезомасштабные возмущения температуры, измеренные микроволновым лимбовым зондировщиком (MLS) со спутника «Aura» в течение 2005–2008 годов. Рисунок 9 в этой работе похож на наш рис. 4. Он также показывает максимальные мезомасштабные вариации температуры на высотах $20 \div 30$ км в зимние периоды в обоих полушариях. Анализ рис. 9 из работы [30] показал постоянство структуры сезонных колебаний на высотах до 45 км.

Авторы работ [30, 8] нашли хорошее соответствие между дисперсиями мезомасштабных возмущений температуры и структурой зональных струйных течений в стратосфере. В сочетании с результатами раздела 2, можно сделать вывод, что изменения в струйных течениях и частоте Брента—Вяйсяля могут влиять на временные, широтные и долготные структуры мезомасштабных дисперсий показателя преломления в атмосфере.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье выполнен анализ мезомасштабных вариаций показателя преломления (сухой температуры) в атмосфере на высотах от 5 до 35 км, полученных из данных 8-летнего спутникового эксперимента GPS/CHAMP. Вариации радиорефракции могут дать информацию о глобальном распределении динамически активных зон в атмосфере, где можно ожидать усиления турбулентности и генерации акустико-гравитационных волн. Изменения в струйных течениях и частоте Брента—Вяйсяля могут влиять на временную и пространственную структуры мезомасштабных дисперсий атмосферной температуры и показателя преломления. Среднезональные мезомасштабные дисперсии атмосферного индекса радиорефракции имеют максимумы на высотах 15÷25 км и широтах от 20° ю. ш. до 20° с. ш., которые могут быть связаны с генерацией и распространением акустико-гравитационных волн в экваториальной атмосфере. На высотах около 10 км максимумы мезомасштабных дисперсий радиорефракции коррелируют с расположением струйных течений в верхней тропосфере. Выше 25 км дисперсии индекса радиорефракции больше в зимний период, чем летом в обоих полушариях. Существует положительная корреляция между мезомасштабными дисперсиями показателя преломления и частотой Брента—Вяйсяля в стратосфере.

Авторы выражают благодарность Дж. Викерту (J. Wickert) и К. Райгберу (Ch. Reigber) за предоставление данных GPS-спутника CHAMP, также А. Н. Гаврилову за помощь в разработке программного обеспечения. Исследование было проведено при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-00443А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ware R., Rocken C., Solheim F., et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77, No. 1. P. 19.
2. Rocken C., Athes R., Exner M., et al. // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, No. D25. P. 29 849.
3. Гурвич А. С., Кан В., Федорова О. В. // Изв. РАН. ФАО. 2000. Т. 36, № 3. С. 330.
4. Tsuda T., Nishida M., Rocken C., et al. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, No. D6. P. 7 257.
5. Alexander M. J., Tsuda T., Vincent R. A. // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, No. 8. P. 1 394.
6. Gavrilov N. M., Karpova N. V., Jacobi Ch., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2004. V. 66, No. 6. P. 427.
7. Гаврилов Н. М., Карпова Н. В. // Изв. РАН. ФАО. 2004. Т. 40, № 6. С. 747.
8. Alexander S. P., Tsuda T., Kawatani Y. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 10. Art. no. L10808.
9. Alexander S. P., Tsuda T., Kawatani Y., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. 24. Art. no. D24115.
10. Alexander P., Luna D., De la Torre A., et al. // Adv. Space Res. 2010. V. 45, No. 10. P. 1 231.
11. Wang L., Alexander M. J. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. D18. Art. no. D18108.
12. Wang L., Alexander M. J. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, No. D21. Art. no. D21122.
13. Schmidt T., De la Torre A., Wickert J. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 16. Art. no. L16807.
14. Venkat Ratnam M., Tetzlaff G., Jacobi Ch. // J. Atmos. Sci. 2004. V. 61, No. 13. P. 1 610.
15. De la Torre A., Tsuda T., Hajj G. A., et al. // J. Meteorol. Soc. Japan. 2004. V. 82, No. 1B. P. 407.
16. De la Torre A., Schmidt T., Wickert J. // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33, No. 24. Art. no. L24809.
17. Гаврилов Н. М. // Изв. РАН. ФАО. Т. 43, № 4. С. 492.
18. Namboothiri S. P., Jiang J. H., Kishore P., et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, No. 7. Art. no. D07102.
19. Wickert J., Beyerle G., König R., et al. // Ann. Geophys. 2005. V. 23, No. 3. P. 653.
20. Wickert J., Galas R., Schmidt T., et al. // Phys. Chem. Earth. 2004. V. 29, No. A2-3. P. 267.

21. Press W. H., Teukolsky S. A., Vetterling W. T., et al. // Numerical recipes in FORTRAN 77. The art of scientific computing. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 973 p.
22. Wickert J., Schmidt T., Beyrle G., et al. // J. Meteorol. Soc. Jap. 2004. V. 82, No. 18. P. 381.
23. Horinouchi T., Tsuda T. // J. Geophys. Res. 2009. V. 114, No. D16. Art. no. D16110.
24. Alexander P., De la Torre A., Llamedo P., et al. // Atmos. Meas. Tech. Disc. 2011. V. 4, No. 1. P. 1181.
25. Горбунов М. Е., Лауритсен К. Б., Родин А. и др. // Изв. РАН. ФАО. 2005. Т. 41, № 6. С. 798.
26. Gorbunov M. E., Gurvich A. S. // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, No. D12. P. 13 819.
27. Gorbunov M. E., Gurvich A. S., Korblueh L. // Radio Sci. 2000. V. 35, No. 4. P. 1025.
28. Jensen A. S., Lohmann M., Benzon H. H., et al. // Radio Sci. 2003. V. 38, No. 3. Art. no. 1040
29. Gavrilov N. M., Fukao S. // Ann. Geophys. 2004. V. 22, No. 11 P. 3889.
30. Wu D. L., Eckermann S. D. // J. Atmos. Sci. 2008. V. 65, No. 12. P. 3695.

Поступила в редакцию 16 июня 2015 г.; принята в печать 12 января 2016 г.

LONG-TERM GLOBAL DISTRIBUTIONS OF MESOSCALE VARIATIONS IN ATMOSPHERIC RADIO REFRACTION FROM THE GPS CHAMP SATELLITE DATA

N. M. Gavrilov and R. O. Manuilova

We obtained the average global distributions of standard deviations of the mesoscale variations in the atmospheric radio-refraction index (refractive index) at the altitudes 5–35 km from the data of the radio-occultation experiments performed during the operation of the low-orbit GPS satellite CHAMP in the period 2001–2009. The filtering of the vertical profiles of the radio-refraction index allows one to determine the standard deviations of the variations with the vertical scales below 8 km. The time-latitude distributions of the zonal-mean standard deviations demonstrate significant interannual variations at various altitudes. Seasonal variations in the standard deviations of radio refraction are studied. Quasi-biennial oscillations at low latitudes are revealed. Acoustic-gravity waves and turbulent and convective motions in the atmosphere can cause standard deviations of the radio-refraction index.