

УДК 551.511.32

## ВЫСОТНО-ШИРОТНАЯ СТРУКТУРА ВЕРТИКАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ ВЕТРА МИГРИРУЮЩЕГО ПОЛУСУТОЧНОГО ПРИЛИВА В ОБЛАСТИ ВЕРХНЕЙ МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ (80–100 КМ)

© 2011 г. Ю. И. Портнягин\*, Е. Г. Мерзляков\*, Т. В. Соловьёва\*, А. И. Погорельцев\*\*, Е. В. Суворова\*\*, П. Мухтаров\*\*\*, Д. Панчева\*\*\*

\* Научно-производственное объединение “Тайфун”

249038 Обнинск, Калужская обл., ул. Победы, 4

E-mail: yportgin@typhoon.obninsk.ru

\*\* Российский государственный гидрометеорологический университет

195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский просп., 98

\*\*\* Геофизический институт Болгарской академии наук

г. София, Болгария

Поступила в редакцию 14.01.2010 г., после доработки 16.03.2010 г.

На основе эмпирических высотно-широтных распределений среднемесячных параметров колебаний горизонтальной составляющей ветра полусуточного мигрирующего прилива рассчитаны высотно-широтные распределения параметров вертикальной составляющей ветра полусуточного прилива для области мезосферы и нижней термосферы (80–100 км). Проводится сравнение построенных распределений с результатами численного моделирования мигрирующего полусуточного прилива с помощью модели глобальной циркуляции средней и верхней атмосферы, а также с распределениями параметров полусуточных колебаний температуры, полученными из данных спутниковых измерений. Показано, что с точностью до ошибок значений различные модели дают хорошо согласующиеся распределения параметров полусуточных колебаний. Особенностью построенных в работе распределений параметров полусуточных колебаний вертикального ветра является наличие высокоширотных областей локальных максимальных значений амплитуд. В целом, на высотах около 90 км и выше полусуточные колебания вертикального ветра превосходят по амплитуде преобладающий вертикальный ветер.

**Ключевые слова:** мезосфера, нижняя термосфера, приливы, вертикальный ветер.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные приливы представляют собой внутрисуточные крупномасштабные колебания температуры, ветра, давления и других атмосферных параметров с периодами, кратное которым равно солнечным суткам. На высотах мезосферы и нижней термосферы (80–100 км, МНТ-область) приливные колебания являются преобладающими регулярными вариациями атмосферных параметров, а амплитуды приливных колебаний скорости ветра сравнимы по величине с фоновым преобладающим ветром. В данной работе речь пойдет о мигрирующем полусуточном приливе, основным источником которого является термический нагрев за счет поглощения озоном солнечной радиации. Мигрирующий прилив строго следует за Солнцем и его характеристики не зависят от долготы при фиксированном солнечном локальном времени. Основные высотно-широтные структуры параметров мигрирующего полусуточного прилива для горизонтального ветра были представ-

лены в [1–3] на основе наземных радарных измерений ветра в МНТ-области.

Скорость вертикального ветра является важным динамическим параметром, необходимым для оценки потоков импульса [4], для исследования процессов обмена энергией и импульсом между верхними и нижними слоями атмосферы, для изучения процессов вертикального переноса различных атмосферных газов.

Изменение вертикального переноса в течение суток представляет особый интерес для анализа данных, получаемых в определенное время суток, например, по измерениям ночных эмиссий атмосферы. Численные оценки показывают, что основная часть изменчивости NO, OH, O в МНТ связаны с сезонным изменением амплитуд приливов [5–6].

В данной работе будут представлены полуэмпирические высотно-широтные распределения параметров колебаний вертикального ветра, связанных с мигрирующим полусуточным приливом, для основных сезонов года. В разделе 2 обсуждаются ре-

зультаты численного моделирования вертикально-мигрирующего полусуточного прилива с помощью механистической модели циркуляции верхней атмосферы. В разделе 3 дано краткое описание необходимой для расчетов вертикального ветра эмпирической модели горизонтального ветра, построенной с использованием результатов многолетних измерений горизонтального ветра на сети метеорологических радаров (MR) и радаров, использующих метод частичных отражений (MF). В разделе 4 рассмотрены результаты полуэмпирического моделирования вертикального полусуточного приливного ветра, выполненного на основе модели горизонтального ветра, описанной в разделе 3. В разделе 5 проведено сравнение результатов численного и полуэмпирического моделирования полусуточных вертикальных ветров. В этом же разделе сопоставлены данные о высотно-широтной структуре полусуточных вертикальных ветров и данные о соответствующих распределениях температуры. Заключение дано в разделе 6.

## 2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУСУТОЧНОГО ПРИЛИВНОГО ВЕТРА И ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Для численных расчетов параметров приливных колебаний вертикального ветра и температуры была использована Модель средней и верхней атмосферы (МСВА). Модель МСВА представляет собой трехмерную нелинейную механистическую модель общей циркуляции атмосферы от уровня 1000 гПа до высот термосферы [7, 8]. Это конечно-разностная модель с горизонтальным разрешением  $5^\circ \times 5.625^\circ$  (широта  $\times$  долгота). В качестве вертикальной координаты используется лог-барическая высота  $z = -H \ln(p/1000)$ , где  $p$  – давление в гПа,  $H = 7$  км. Расчеты, представленные в данной работе, были выполнены с помощью 48-уровневой версии МСВА, расстояние между уровнями было фиксированным и равнялось примерно 2.8 км. Таким образом, верхняя граница модели располагается на уровне, соответствующем приблизительно геопотенциальной высоте 150 км (в средней атмосфере геопотенциальная высота приблизительно равна безразмерной, умноженной на 7 км). Прогностическими переменными модели являются горизонтальные компоненты скорости ветра и температура. Геопотенциал и вертикальная скорость представляют собой диагностические переменные, которые рассчитываются с помощью уравнения гидростатики и неразрывности соответственно.

На уровне 1000 гПа задавались осредненные за 1992–2002 гг. распределения геопотенциальной высоты и температуры для января и марта, учитывающие их среднезональные значения, а также распределения параметров стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами  $m = 1-3$ .

Параметры волн были получены из данных, ассимилированных в модели NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research) [9, 10]. Кроме этого, для реалистичного воспроизведения струйных течений в тропосфере в прогностическое уравнение для температуры было введено дополнительное слагаемое, пропорциональное разности наблюдаемой (данные NCEP/NCAR для января, осредненные за 1992–2002 гг.) и рассчитанной среднезональной температур в тропосфере. Константа пропорциональности представляет собой величину, обратно пропорциональную характерному времени релаксации рассчитанной температуры к наблюдаемой температуре. Время релаксации полагалось равным 5 суткам.

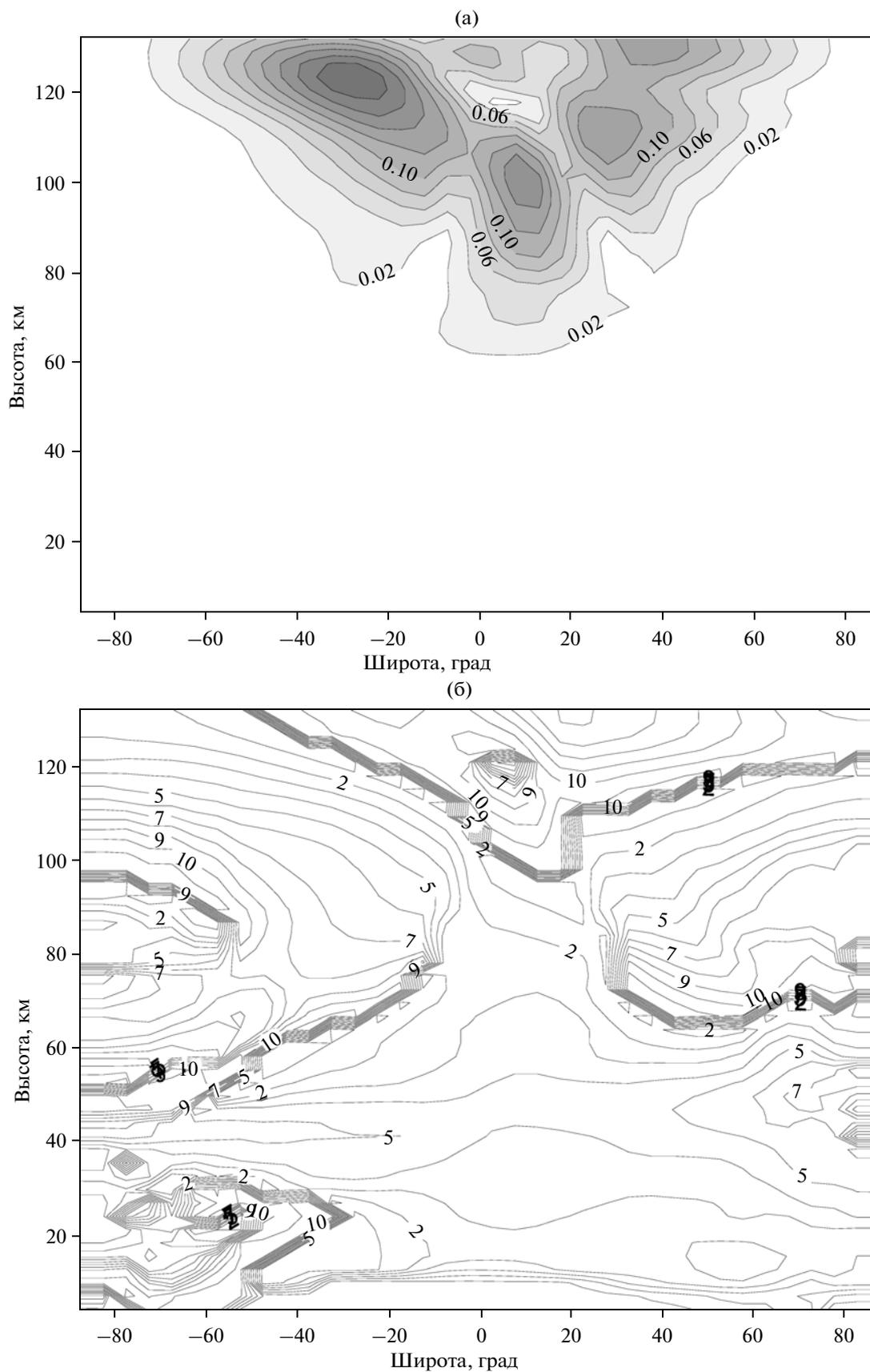
Схема численных экспериментов детально описана в [7]. Результаты расчетов, представленные в данной работе, следует рассматривать как климатические среднemesячные.

На рис. 1 представлены высотно-широтные разрезы амплитуд и фаз колебаний вертикального ветра для полусуточного мигрирующего прилива по результатам численного моделирования для периода солнцестояния (январь). Обращают на себя внимание три хорошо выраженные области сравнительно высоких амплитуд. В экваториальной области максимальные амплитуды характерны для высот 80–100 км. Два других максимума расположены в субтропических и умеренных широтах примерно на 15–20 км выше максимума экваториальной ячейки. При этом хорошо видна определенная асимметрия в структуре этих ячеек для Северного и Южного полушарий. Распределение фаз (время максимума) в областях с наибольшими амплитудами регулярно и соответствует распространению колебания снизу вверх. Оценки вертикальной длины прилива в пределах МНТ-области дают значения более 100 км в летний сезон (Южное полушарие) и приблизительно 50 км в зимний (Северное полушарие).

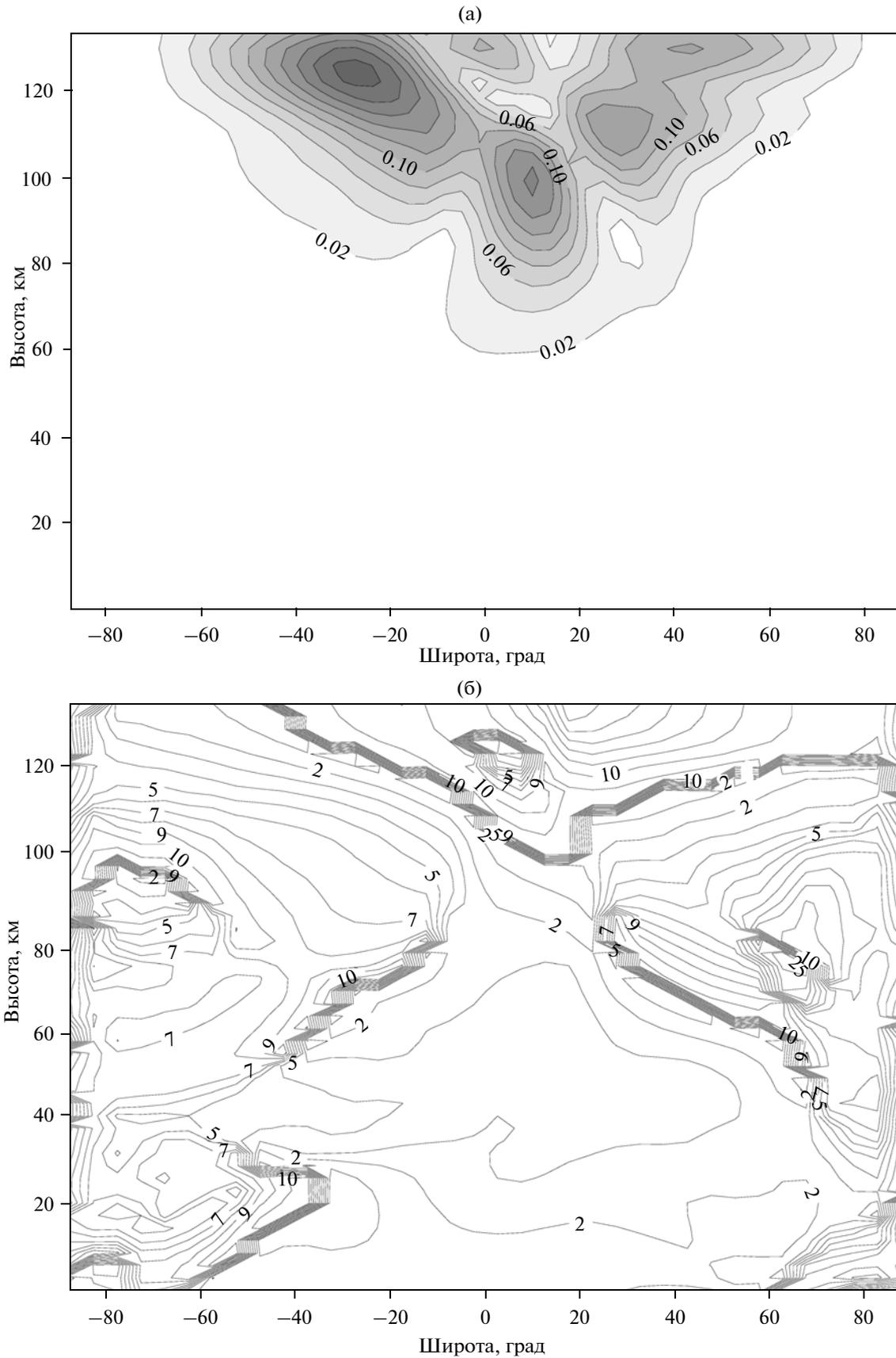
Для последующего анализа удобно ввести понятие “эквивалентного” вертикального ветра, основанного на известной взаимосвязи комплексных амплитуд вертикального ветра и температуры в гравитационных волнах и приливах. “Эквивалентный” вертикальный ветер получен умножением комплексной приливной температуры на множитель, равный

$$-i\omega \left/ \left( \frac{\partial T_0}{\partial z} + \frac{\kappa T_0}{H} \right) \right. \quad (1)$$

Это выражение получается из линеаризованного уравнения притока тепла для полусуточного прилива при отсутствии источников, стоков, диссипативных процессов и среднего переноса [11]. В (1) используются обозначения:  $\omega$  – циклическая частота полусуточных колебаний,  $T_0$  – среднезональная невозмущенная температура,  $\kappa = (\gamma - 1)/\gamma$ ,  $\gamma$  – показатель адиабаты воздуха.



**Рис. 1.** Высотно-широтные распределения параметров полусуточного мигрирующего прилива для вертикального ветра в январе, численный расчет: а – амплитуда (м/с), б – фаза максимума (ч).



**Рис. 2.** Высотно-широтные распределения параметров полусуточного мигрирующего прилива для “эквивалентного” вертикального ветра в январе, численный расчет: а – амплитуда (м/с), б – фаза максимума (ц).

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов амплитуды и фазы полусуточных колебаний “эквивалентного” вертикального ветра. Обращает на себя внимание хорошее соответствие между высотно-широтными структурами в распределениях параметров и значениями параметров полусуточных колебаний вертикального ветра (рис. 1) и “эквивалентного” вертикального ветра (рис. 2). Этот вывод также согласуется с результатами, полученными в [12]. Полученное соответствие между структурами вертикального и “эквивалентного” вертикального ветра весьма принципиально для последующего анализа, поскольку оно дает основание напрямую сравнивать экспериментальные данные о температуре по результатам спутникового зондирования и полуэмпирические данные о вертикальном ветре, следующие из наших расчетов.

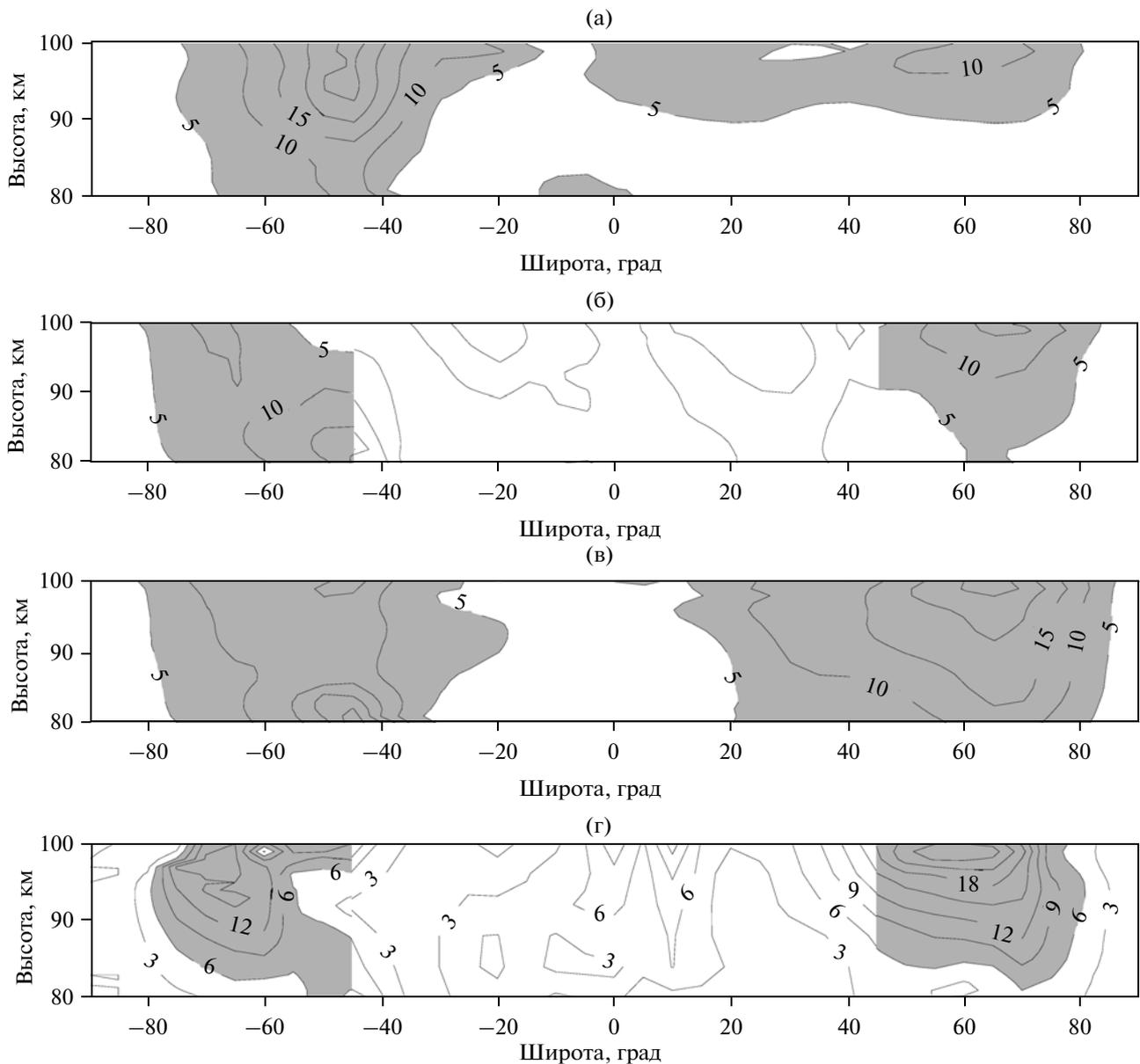
### 3. ЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУСУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЕТРА В ВЕРХНЕЙ МЕЗОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЕ

Для построения модели полусуточных приливных вариаций горизонтального ветра были использованы результаты многолетних измерений горизонтального ветра на сети метеорных радаров (MR) и радаров, использующих метод частичных отражений (MF). Сеть насчитывает 47 станций, расположенных на различных долготах и широтах Северного и Южного полушарий. За единичным исключением станции позволяют получать вертикальный профиль горизонтального ветра. Данные, полученные на различных станциях, покрывают различные периоды, но в основном используются измерения за период 1990–2003 гг. Данная база результатов измерений МНТ-ветра данных значительно превосходит ту, которая анализировалась в работе [1] (30 станций). Расположение станций приведено в [13].

Построение высотно-широтных распределений для каждой составляющей проводилось с использованием варианта метода наименьших квадратов, разработанного ранее в геодезии, с целью корректной интерполяции значений, неравномерно расположенных по пространственной сетке. При этом интерполируемые экспериментальные данные берутся с весом, зависящим от расстояния между координатами данных и координатами рассчитываемой точки в узле сетки. Весовые коэффициенты выбирались так, чтобы  $\sigma_{\text{lat}} = 7.5^\circ$ ,  $\sigma_h = 2$  км, где  $\sigma_{\text{lat}}$  и  $\sigma_h$  — стандартное отклонение весовой функции по широте и высоте соответственно. Приливные колебания каждой компоненты скорости характеризуются амплитудой  $A$  и фазой максимума  $\Phi_m$  в часах локального солнечного времени. Иными словами, каждой компоненте можно сопоставить синусный и косинусный коэффициенты:  $A \sin \Phi_m$  и  $A \cos \Phi_m$  соответственно. Интерполяция неравномерно распределенных данных проводится для синусных и косинусных

коэффициентов отдельно. При этом построении долгота станций не учитывается. Таким образом, фактически осуществляется усреднение по долготе при фиксированном солнечном локальном времени, т.е. сохраняется только мигрирующий прилив. Затем из полученных распределений на равномерной по высоте и широте сетке рассчитываются распределения амплитуд и фаз максимума для соответствующей приливной составляющей. Дополнительно отметим, что в Южном полушарии для широт выше  $68^\circ$  используются параметры мигрирующего прилива, полученные в [14]. Как выше отмечалось, данные получены на различных станциях за разные годы, но для каждой станции период измерений составляет не менее трех лет. Различное количество лет, используемых для получения климатических параметров, вносит дополнительную случайную ошибку в полученные среднемноголетние значения, которые имеют ошибку также из-за особенностей измерений ветра. Чтобы оценить вклад различных вариантов усреднения, нами были взяты наиболее длинные ряды данных для северных и южных широт и проведено сравнение среднемноголетних значений, полученных по полному ряду, со средними, вычисленными за 3-летний произвольно взятый период. Максимальное отклонение составило 3 м/с для средних значений амплитуд более 10 м/с. Случайная ошибка также возникает из-за неточности измерений. Ее вклад в модельные значения оценивается величиной до 5 м/с для амплитуд. Модельные фазы прилива имеют случайную ошибку до 4 часов. Кроме случайной ошибки, построенные модельные распределения амплитуд и фаз полусуточного прилива характеризуются еще систематической ошибкой. Она возникает из-за неполного усреднения по долготе немигрирующих приливов, поскольку станции распределены по долготам неравномерно. Для оценки величины систематической ошибки были использованы параметры немигрирующих приливов, полученные в [15]. Из этих данных для каждой станции можно рассчитать среднечасовой ветер, обусловленный основными немигрирующими полусуточными приливами. Затем вместо реальных данных о полусуточном приливе берутся параметры полусуточного прилива, рассчитанные из значений ветра, обусловленного немигрирующими приливами, и проводится процедура построения модельных распределений, описанная выше. Величины ошибок, связанные с немигрирующими приливами, могут быть в 2 раза меньше, если учесть результаты сравнения амплитуд немигрирующего суточного прилива, полученных по данным измерений на спутниках TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics) и UARS (Upper Atmosphere Research Satellite). В работе [16] получено, что данные по UARS, в основном, дают амплитуды в 2 раза меньше, чем по TIMED.

На рис. 3 показаны высотно-широтные распределения амплитуд зональной компоненты мигрирующего прилива, построенные по радарным данным.



**Рис. 3.** Высотно-широтные распределения амплитуды полусуточного мигрирующего прилива для зональной компоненты ветра (м/с), эмпирическая модель: а – март; б – июнь; в – сентябрь; г – декабрь. Серым цветом выделены значимые значения амплитуд.

Значимая величина амплитуды, т.е. превосходящая среднеквадратичную ошибку, выделена серым цветом. В периоды равноденствия систематическая ошибка мала, а в периоды солнцестояния параметры мигрирующего прилива от экватора до 45° градусов Южной широты неопределенны на высотах до 90 км. Принципиальное отличие построенных модельных распределений параметров полусуточного прилива от распределений, представленных в [1], состоит в том, что значимый градиент в амплитудах наблюдается во всем высотном интервале. Предыдущая модель [1] показывала значительное насыщение амплитуд прилива по всему высотному слою 80–100 км.

#### 4. ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОТНО-ШИРОТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУСУТОЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВЕТРА

Для расчета приливно-вертикального ветра используется следующее уравнение:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} (v \cos \varphi) + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (\rho_0 w)}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где  $u$ ,  $v$  и  $w$  – скорости ветра в зональном, меридиональном и вертикальном направлении соответственно (положительные направления – на восток, к северу и вверх соответственно);  $a$  – радиус Земли;

$\varphi$  — широта,  $\lambda$  — долгота;  $\rho_0 = \exp(-z/H)$ . Уравнение (2) записано в лог-барической системе координат. Расчет ведется сверху вниз. На верхней границе модели задаются граничные значения  $w$ , которые неизвестны из данных радарных наблюдений. Чтобы их определить, были использованы результаты анализа спутниковых измерений температуры прибором SABER на спутнике TIMED. В работе [17] приведены параметры мигрирующего полусуточного прилива в температуре, которые были пересчитаны в “эквивалентный” вертикальный ветер на верхней границе. Данные о вертикальном ветре для широт более  $50^\circ$  получаются интерполяцией данных между этими широтами и полюсами, на которых полагаются  $w = 0$ . Чтобы корректно учесть поведение вертикальной скорости в окрестности полюсов, мы использовали разложение по функциям Хафа до моды (2,7) включительно, в обозначениях работы [11]. Отметим, что для некоторых месяцев (например, для июня) можно рассчитать параметры полусуточных колебаний температуры и для высоких широт Северного полушария (вплоть до  $80^\circ$  N), для других месяцев (например, для декабря) для высоких широт Южного полушария. Этот факт был использован, чтобы оценить влияние проведенной интерполяции на рассчитанные значения параметров прилива в высоких широтах. Как можно было ожидать, в силу экспоненциального падения плотности, результаты практически не изменяются — отличие значительно меньше случайной ошибки.

Выше описанные ошибки в распределениях параметров горизонтального приливного ветра транслируются согласно уравнению (2) в ошибки в параметрах вертикального ветра. Случайная ошибка амплитуды оценивается величиной примерно 1.5 см/с, а систематическая — около 4 см/с. Посчитанные значения вертикального ветра принимаются как значимые, если величина амплитуды колебаний ветра превосходит ошибку. Для систематической ошибки мы можем получить только приближенную оценку величины и распределения по широтам и высотам, поэтому нет возможности учесть этот систематический сдвиг при вычислениях параметров вертикальной скорости.

На рис. 4 приведены высотно-широтные разрезы амплитуд и фаз полусуточного приливного вертикального ветра для основных сезонов года. Области значимых значений амплитуд выделены серым цветом. Во все месяцы на этих разрезах хорошо видны субтропические структуры повышенных амплитуд. Незамкнутость изолиний в этих структурах свидетельствует о том, что они распространяются на высоты, превышающие те, которые обеспечены экспериментальными данными, необходимыми для соответствующих оценок. Для периодов солнцестояния экваториальная зона повышенных амплитуд слабо выражена по сравнению с периодами равноденствия, когда амплитуды в этих областях

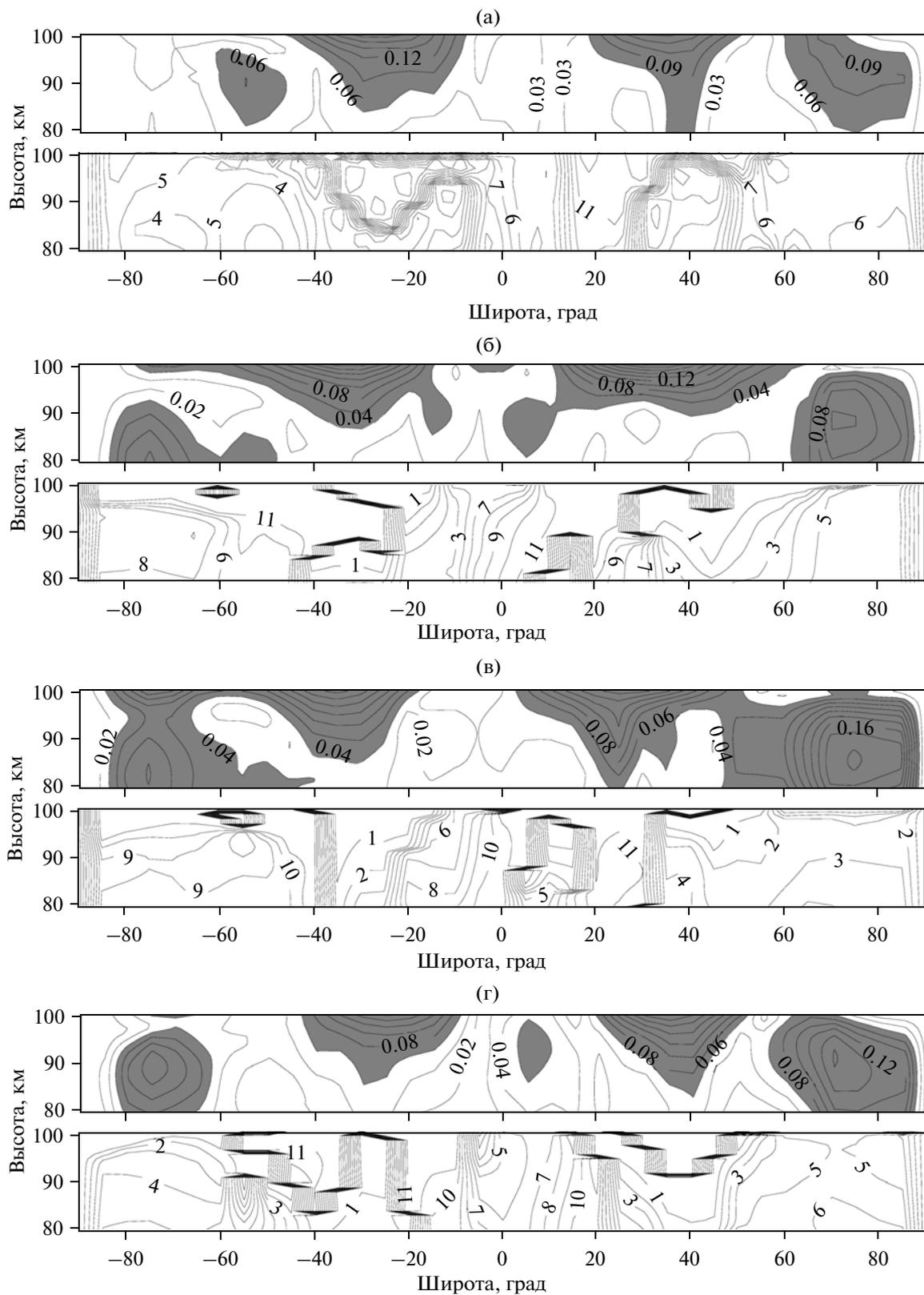
становятся значимыми. Положение максимумов в субтропических ячейках циркуляции изменяется с сезоном по широте. Наиболее близко к экватору (порядка  $25\text{--}30$  град) максимумы расположены в июне, тогда как в декабре эти максимумы смещены в сторону умеренных широт. Важной особенностью приведенных распределений является наличие высокоширотных областей повышенных амплитуд во все сезоны года. Фазы во всех областях с высоким значением амплитуд изменяются с высотой регулярным образом, причем знак высотных градиентов фаз соответствует распространению колебания снизу вверх (минимальные значения времени максимума соответствуют максимальным высотам), а значения вертикальных градиентов фаз соответствуют длинам волн от 40 км и больше при минимальных значениях в зимний период.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

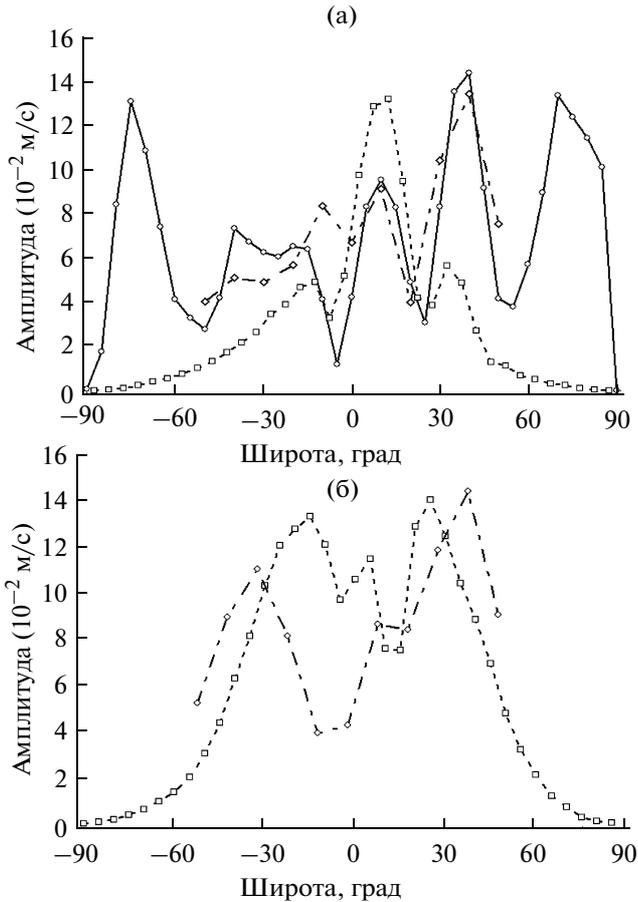
На рис. 5а приведено сравнение зависимости амплитуд полусуточного вертикального ветра от широты для высоты 90 км по данным численных расчетов, данным полуэмпирического моделирования и соответствующей зависимости “эквивалентного” полусуточного ветра, вычисленного по данным спутниковых измерений температуры [16]. Можно отметить удовлетворительное согласие между всеми тремя зависимостями в низких и умеренных широтах, несмотря на некоторое различие в положении максимумов и абсолютных значений амплитуд. В настоящее время спутниковые данные пока не позволяют сделать оценки амплитуд “эквивалентного” полусуточного вертикального ветра для высоких широт. Отсутствие высокоширотных максимумов в результатах численных расчетов, возможно, объясняется используемой в численной модели процедурой сглаживания вблизи полюсов.

На рис. 5б приведены соответствующие зависимости для высоты 105 км, для которой результаты полуэмпирического моделирования отсутствуют, поскольку верхняя граница полуэмпирической модели расположена на высоте 100 км. Из этого рисунка видно, что субтропические области с высокими амплитудами и их абсолютные значения амплитуд для Северного полушария по данным обоих методов хорошо совпадают, тогда как в Южном полушарии при совпадении общего характера широтной зависимости наблюдается некоторое смещение максимумов по широте.

Рисунок 6а, 6б иллюстрирует зависимости, аналогичные приведенным на рис. 5, но для марта месяца. Обращает на себя внимание достаточно хорошее подобие характера широтной зависимости по данным различных методов в интервале широт  $50^\circ$  S— $50^\circ$  N при некотором различии значений максимальных амплитуд. В полуэмпирической модели вновь обнаруживаются дополнительные высокоширотные области повышенных амплитуд.



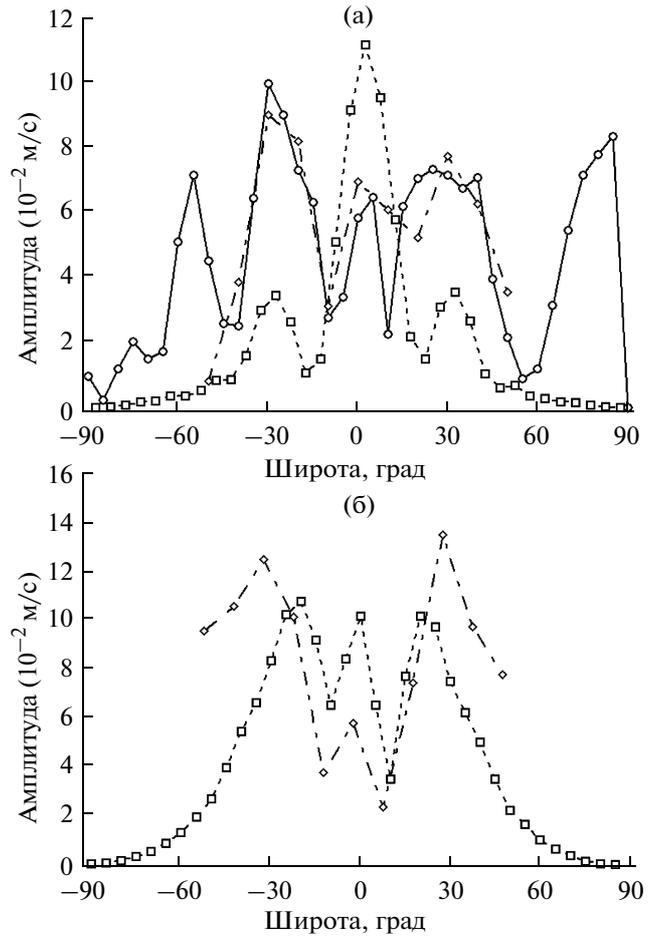
**Рис. 4.** Высотно-широтные распределения параметров полусуточного мигрирующего прилива для вертикальной компоненты ветра, расчет из эмпирической модели горизонтального ветра: а – март; б – июнь; в – сентябрь; г – декабрь. Амплитуда показана в м/с, фаза (время максимума) в часах.



**Рис. 5.** Сравнение амплитуд полусуточных колебаний вертикального ветра по различным моделям для января: сплошные линии — расчеты из горизонтального ветра, штриховые линии — численный расчет по МСВА, штрихпунктирные линии — “эквивалентный” вертикальный ветер; а — высота 90 км; б — высота 105 км.

Для удобства сравнения на рис. 7 сведены вместе высотно-широтные распределения амплитуд колебаний вертикального ветра, полученного для марта: а) по данным численного моделирования, б) по данным эмпирической модели горизонтального ветра и в) по данным спутникового зондирования. В целом, различные методы оценок амплитуд полусуточного приливного вертикального ветра для всех сезонов года дают качественно хорошо согласующиеся результаты для средних и низких широт.

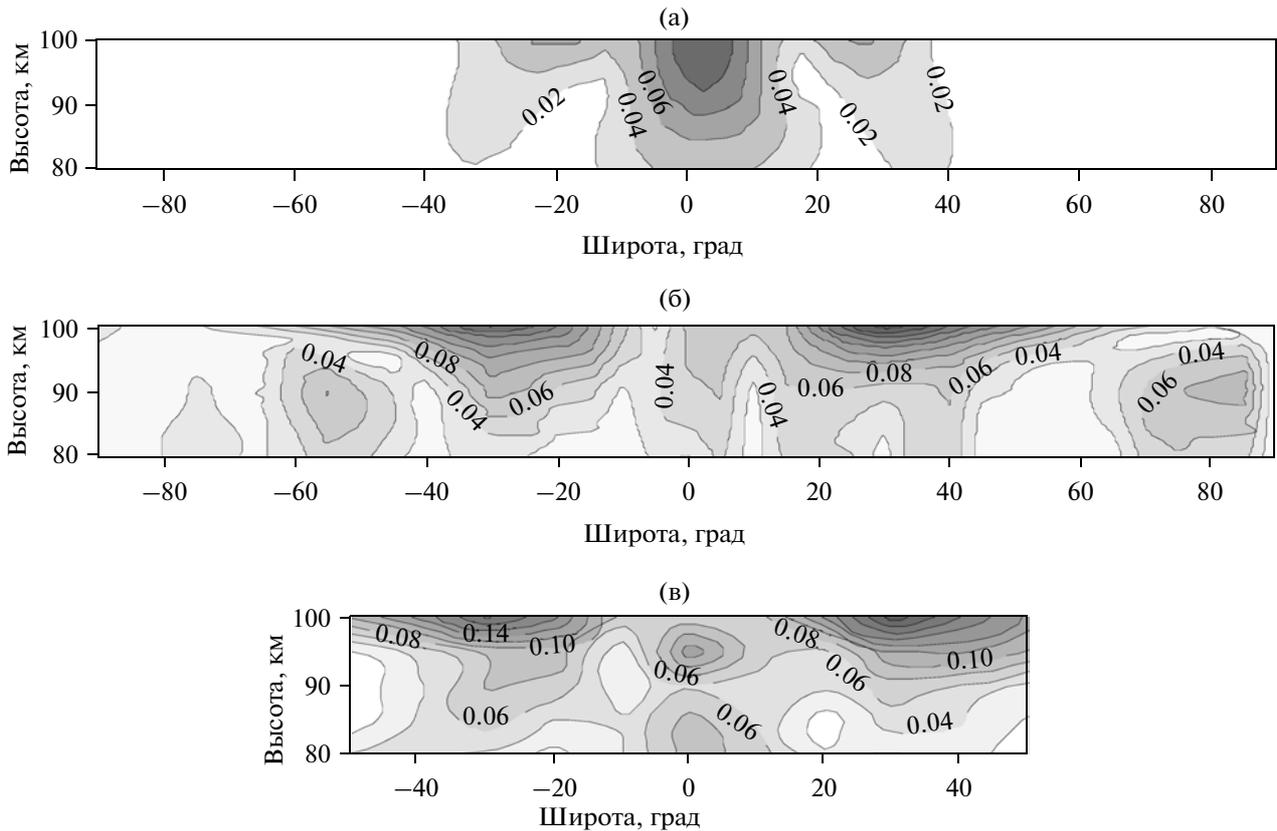
Анализ высотно-широтной структуры фаз полусуточного приливного вертикального ветра для различных сезонов по данным различных методов также показывает подобие этих структур в областях с большими значениями амплитуд. В этих областях наблюдается регулярное изменение фаз по высоте, соответствующее распространению колебаний снизу вверх. На рис. 8 изображены распределения фаз полусуточных колебаний ветра на высоте 90 км в декабре для трех моделей, рассматриваемых в дан-



**Рис. 6.** То же, что и для рис. 5, но для марта.

ной работе. Ошибки фаз, полученных для эмпирической модели ветра, показаны только для амплитуд, больших 0.06 м/с.

Приближенные оценки значений длин волн по данным численного и полуэмпирического моделирования дают близкие значения в диапазоне от 50 км и более. При этом в летний сезон соответствующие длины волн значительно больше, чем в зимний сезон. Этот результат согласуется с выводами работы [18], в которой анализировались результаты наземных измерений температуры в МНТ-области над пунктом Форт Коллинз за 2002–2006 гг. Согласно с данными спутниковых измерений [17] только качественное. Согласно [17] абсолютные значения длин волн существенно меньше и близки в среднем в течение года к величине порядка 35 км для широт до 50 градусов. На основании этого результата в работе [18] делается вывод о различном модовом составе приливных колебаний по спутниковым и наземным данным измерений температуры, поскольку значения вертикальных длин волн непосредственным образом связаны с модовым составом прилива. Следует отметить, что наши оценки вертикальных длин, во-первых, содержат ошибку (рис. 7), во-вторых, нахо-



**Рис. 7.** Высотно-широтные распределения амплитуд колебаний вертикального ветра, полученного для марта: а – по данным численного моделирования, б – по данным эмпирической модели горизонтального ветра и в – по данным спутникового зондирования.

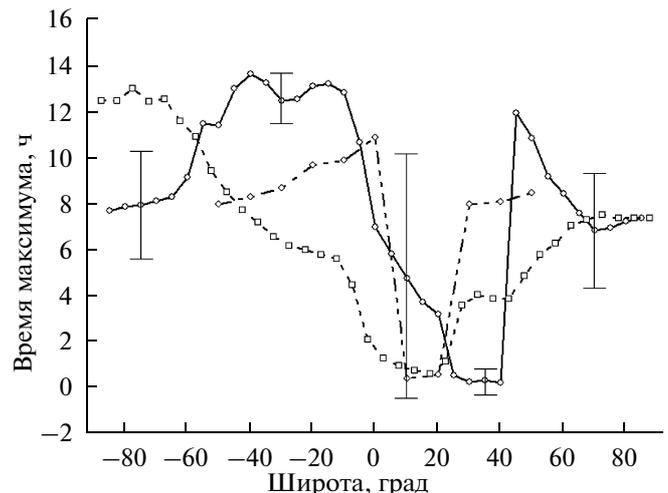
дятся на коротком интервале высот по сравнению с длиной волны. Можно сказать, что эти оценки сильно неустойчивы к ошибке фаз. Поэтому выводов о каком-либо расхождении с результатами работы [17] сделать нельзя. Для выяснения причины наблюдаемых различий требуется проведение дополнительного анализа данных спутниковых и наземных измерений, проведенных на различных долготах и широтах одновременно

### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены высотно-широтные распределения амплитуд и фаз колебаний вертикального ветра, вызванные полусуточным мигрирующим приливом. Расчеты выполнены на основе эмпирической модели полусуточных колебаний горизонтального ветра в МНТ-области, и результаты в целом согласуются с данными многолетних наземных измерений температуры. По порядку амплитуд результаты согласуются также с данными спутниковых наблюдений, однако последние дают более короткие (почти в 2 раза) длины волн по вертикали.

Результаты численного моделирования полусуточного прилива с помощью модели МСВА качественно согласуются с эмпирическими данными наземных наблюдений. Модель МСВА хорошо вос-

производит основные структуры приливных колебаний вертикального ветра и температуры и дает правильные величины амплитуд этих колебаний в



**Рис. 8.** Сравнение фаз полусуточных колебаний вертикального ветра по различным моделям для декабря месяца на высоте 90 км: сплошные линии – расчеты из горизонтального ветра, штриховые линии – численный расчет по МСВА, штрихпунктирные линии – “эквивалентный” вертикальный ветер.

средних и низких широтах. С помощью численного моделирования мы получаем согласованные распределения параметров полусуточных колебаний как в вертикальном и горизонтальном ветре, так и в температуре, плотности и других атмосферных параметрах на высотах от поверхности Земли до примерно 150 км. Однако в высоких широтах амплитуда колебаний вертикального ветра (и температуры) недооценивается. Распределения, получаемые из данных наземных и спутниковых измерений, представляют нам реальную картину распределения параметров полусуточных колебаний, но в ограниченном диапазоне высот и широт и со значительной ошибкой.

Насколько известно авторам, эмпирической модели полусуточных колебаний ветра, аналогичной модели, представленной в данной работе, к настоящему времени опубликовано не было. Особо следует отметить результат данной работы, связанный с наличием локальных максимумов амплитуд полусуточных колебаний вертикального ветра в высоких широтах. В целом значения амплитуд полусуточных колебаний вертикального ветра в МНТ-области превосходят преобладающий среднезональный вертикальный ветер [19]. Особенно эта закономерность проявляется на высотах более 90 км. Таким образом, при измерениях в течение части суток, например, ночных измерениях температур, полученные результаты очень важны, с нашей точки зрения, для интерпретации данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-05-00710). Авторы благодарны доктору Оберхейду за разрешение использовать результаты анализа немигрирующих полусуточных приливов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Portnyagin Yu.I., Solovjova T.V.* Empirical semidiurnal tide model for the upper mesosphere/lower thermosphere // *Adv. Space Res.* 1998. V. 31. № 6. P. 811–815.
2. *Jacobi Ch., Portnyagin Yu.I., Solovjova T.V. et al.* Climatology of the semidiurnal tide at 52°–56° N from ground-based radar wind measurements 1985–1995 // *Journ. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 1999. V. 61. № 13. P. 975–991.
3. *Portnyagin Y.I., Solovjova T.V., Makarov N.A. et al.* Monthly mean climatology of the prevailing winds and tides in the Arctic mesosphere/lower thermosphere // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22. № 10. P. 3395–3410.
4. *Miller M.J., Palmer T.N., Swinbank R.* Parameterization and influence of subgridscale orography in general circulation and weather prediction models // *Meteorol. Atmos. Phys.* 1989. V. 40. № 8–11. P. 84–109.
5. *Marsh D., Roble R.* TIME-GSM simulations of lower-thermosphere nitric oxide seen by the halogen occultation experiment // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2002. V. 64. № 8–11. P. 889–895.
6. *Zhang S.P., Shepherd G.G.* The influence of the diurnal tide on the O(<sup>1</sup>S) and OH emission rates observed by WINDII on UARS // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. № 4. P. 529–532.
7. *Погорельцев А.И.* Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными вассилляциями // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2007. Т. 43. № 4. С. 463–475.
8. *Pogoreltsev, A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K. et al.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. № 17–18. P. 2083–2101.
9. *Kalnay E. et al.* The NCEP/NCAR reanalysis project // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. № 3. P. 437–471.
10. *Kistler R., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 2001. V. 82. № 2. P. 247–267.
11. *Чепмен С., Лундзен Р.* Атмосферные приливы. М.: Мир, 1972. 296 с.
12. *Zhu X., Yee J.-H., Talaat E.R.* Diagnostic analysis of tidal winds and the Eliassen-Palm flux divergence in the mesosphere and lower thermosphere from TIMED/SABER temperatures // *Journ. Atm. Sci.* 2008. V. 65. № 12. P. 3840–3859.
13. *Portnyagin Yu., Solovjova T., Merzlyakov E. et al.* Mesosphere/lower thermosphere prevailing wind model // *Adv. Space Res.* 2004. V. 34. № 8. P. 1755–1762.
14. *Murphy D.J., Forbes J.M., Walterscheid R.L. et al.* A Climatology of Tides in the Antarctic Mesosphere and Lower Thermosphere // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D23104. doi: 10.1029/2005JD006803.
15. *Oberheide J., Wu Q., Orland D.A. et al.* A climatology of nonmigrating semidiurnal tides from TIMED Doppler Interferometer (TIDI) wind data // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2007. V. 69. № 17–18. P. 2203–2218.
16. *Oberheide J., Wu Q., Orland D.A. et al.* Nonmigrating diurnal tides as measured by the TIMED Doppler Interferometer: Preliminary results // *Adv. Space Res.* 2005. V. 35. № 11. P. 1911–1917.
17. *Pancheva D., Mukhtarov P., Andonov B.* Global structure and interannual variability of the migrating semidiurnal tide seen in the SABER/TIMED temperatures (2002–2007) // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. № 2. P. 687–703.
18. *Yuan T., Schmidt H., She C.Y. et al.* Seasonal variations of semidiurnal tidal perturbations in mesopause region temperature and zonal and meridional winds above Fort Collins, Colorado (40.6° N, 105.1° W) // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. D20103. P. 1–12.
19. *Портнягин Ю.И., Соловьева Т.В., Мерзляков Е.Г. и др.* Высотно-широтная структура вертикального ветра в области верхней мезосферы и нижней термосферы (70–110 км) // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. Т. 46. № 1. С. 95–104.

## Height–Latitude Structure of the Vertical Component of the Migrating Semidiurnal Tide in the Upper Mesosphere and Lower Thermosphere Region (80–100 km)

Yu. I. Portnyagin<sup>a</sup>, E. G. Merzlyakov<sup>a</sup>, T. V. Solov'eva<sup>a</sup>, A. I. Pogorel'tsev<sup>b</sup>, E. V. Suvorova<sup>b</sup>, P. Mukhtarov<sup>c</sup>, and D. Pancheva<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *NPO Taifun, ul. Pobedy 4, Obninsk, Kaluga oblast, 249038 Russia*  
*e-mail: yportgin@typhoon.obninsk.ru*

<sup>b</sup> *Russian State Hydrometeorological University, Malookhtinskii pr. 98, St. Petersburg, 195196 Russia*

<sup>c</sup> *Geophysical Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

Received January 14, 2010; in final form, March 16, 2010

**Abstract**—The height–latitude distributions of parameters of the vertical wind component of the semidiurnal tide were calculated for the mesosphere and lower thermosphere (MLT) region (80–100 km) on the basis of empirical height–latitude distributions of the monthly mean parameters of variations in the horizontal wind component of the migrating semidiurnal tide. The constructed distributions are compared with the results of a numerical modeling of the migrating semidiurnal tide with the aid of a model of global circulation in the middle and upper atmosphere, as well as with the parameters of semidiurnal temperature variations obtained from the data of satellite measurements. It is shown that different models yield the distributions of parameters of semidiurnal variations, which agree within the errors of their values. The presence of high-latitude regions of local maximal amplitudes is a specific feature of the distributions of parameters of semidiurnal variations in the vertical wind constructed in the course of this work. On the whole, at heights of about 90 km and higher, semidiurnal variations in the vertical wind exceed the prevailing vertical wind in amplitude.

**Keywords:** mesosphere, lower thermosphere, tides, vertical wind