

УДК 551.513.11

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЛАНЕТАРНЫХ ВОЛН¹

© 2022 г. К. А. Диденко^{a, b, *}, **А. И. Погорельцев**^{a, b}

^aРоссийский государственный гидрометеорологический университет,
Воронежская улица 79, Санкт-Петербург, 192007 Россия

^bСанкт-Петербургский государственный университет,
Ульяновская улица 1, Санкт-Петербург–Петродворец, 198504 Россия

*e-mail: didenko.xeniya@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.01.2022 г.

После доработки 04.02.2022 г.

Принята к публикации 09.02.2022 г.

В данной работе показан метод использования непрерывного вейвлет-преобразования Морле в изучении изменчивости атмосферных мигрирующих и немигрирующих приливов. Такой подход позволяет получить амплитуды и фазы отдельных приливных компонент с различными зональными волновыми числами и периодами. Показаны наиболее подходящие периоды, необходимые для восстановления данных. Рассчитанные амплитуды и фазы используются для анализа нелинейных взаимодействий между стационарными планетарными волнами и атмосферными приливами.

Ключевые слова: планетарные волны, атмосферные приливы, вейвлет-преобразование, нелинейные взаимодействия

DOI: 10.31857/S0002351522030051

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о распространении планетарных волн в атмосфере по-прежнему занимает центральное место в работах по атмосферной динамике. Это связано с влиянием таких волн на общую циркуляцию, температурный режим, а также на распределение озона и других химических веществ. Кроме того, зимой в стратосфере часто наблюдается увеличение амплитуды планетарной волны, что приводит к сильным нелинейным явлениям. Одним из таких явлений является генерация вторичных волн, вызванная нелинейным взаимодействием волна-волна. Такие эффекты наиболее ярко проявляются во время внезапных стратосферных потеплений (ВСП) — сильных термодинамических явлений в зимней полярной стратосфере, влияющих на среднюю атмосферу, вызывающих также значительные изменения в тропосфере, мезосфере — нижней термосфере. Возникновение ВСП связано с распространением планетарных волн из тропосферы в стратосферу и дальнейшим их взаимодействием с зональной циркуляцией.

Во время ВСП, часто сильная зимняя западная стратосферная циркуляция в течение нескольких дней сменяется слабым восточным ветром [1, 2].

В работах [3, 4] представлен метод анализа нелинейных взаимодействий стационарных планетарных волн, основанный на исследовании изменчивости возмущения потенциальной энтропии (квадрат потенциального вихря Эртеля). Кроме взаимодействия стационарных планетарных волн с зональными волновыми числами $m_p = 1$ и 2 (СПВ1 и СПВ2) между собой, они взаимодействуют с суточными или полусуточными мигрирующими тепловыми приливами ($m_t = 1$ и 2). Последние, в свою очередь, являются периодическими колебаниями глобального масштаба, которые вызываются поглощением солнечного излучения системой атмосфера поверхность, озоном и водяным паром, а также скрытым теплом в результате тропической глубокой конвекции [5, 6]. Вследствие этих взаимодействий возникают суточный и полусуточный немигрирующие тепловые приливы с $m = m_t \pm m_p$ [7, 8]. Также, необходимо проанализировать взаимодействие приливных составляющих между собой.

¹ Статья подготовлена на основе устного доклада, представленного на Всероссийской конференции “Собственное излучение, структура и динамика средней и верхней атмосферы” (Москва, 22–23 ноября 2021 г.).

Несмотря на то, что исследованию тепловых атмосферных приливов посвящено много работ, вопросы об их сезонной и годовой изменчивости остаются открытыми. Сохраняется необходимость совершенствования моделирования приливов в численных моделях [9]. Изучение генерации и изменчивости различных приливных компонент важно для понимания динамики не только средней, но и верхней атмосферы. Возмущения температуры и ветра, связанные с приливами, становятся очень большими в мезосфере, проникают в термосферу и существенно влияют на ее баланс импульса и термодинамический баланс [10]. Кроме того, генерация немигрирующих атмосферных приливов приводит к долготным различиям в суточных вариациях вертикального ветра и влияет на интенсивность эмиссии гидроксила и концентрацию атомарного кислорода [11–13].

Для того, чтобы стало возможным рассмотреть нелинейные взаимодействия стационарных планетарных волн и приливов и/или приливных компонент между собой, необходимо получить амплитуды и фазы отдельных приливных составляющих. Для этого в качестве исходных данных было решено использовать результаты расчетов с использованием МСВА (модель средней и верхней атмосферы) – трехмерной нелинейной модели общей циркуляции атмосферы от поверхности до высот ионосферного слоя F2 [7, 14]. Безразмерная лог-изобарическая высота $x = -\ln(p/1000)$, где p – давление в гПа, используется в качестве вертикальной координаты. Количество уровней по вертикали может быть произвольным (от 48 до 60). Первая версия МСВА была разработана на основе модели СОММА_LIM (Cologne Model of the Middle Atmosphere – Leipzig Institute for Meteorology) [15, 16]. В данной работе использовалась новая версия модели МСВА, включающая параметризации атмосферных скоростей нагрева, вызванных выделением скрытого тепла, которые учитывают как суточные и долготные осцилляции, так и зависимость от фазы Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) [17, 18]. Был получен ансамбль решений для условий нейтральной фазы Эль-Ниньо, западной фазы квазидвухлетнего колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК). Для анализа выбран один из членов ансамбля, когда моделировалось главное внезапное стратосферное потепление в середине января.

1. МЕТОДИКА

Вейвлет-преобразование может использоваться для анализа временных рядов, содержащих нестационарную мощность на многих различных

частотах, поэтому часто применяется в исследовании как модельных, так и радарных данных. В качестве метода исследования нестационарных сигналов предлагается вейвлет-преобразование Морле. По модельным данным выявлено, что это вейвлет-преобразование особенно удобно для анализа сигналов с: широким диапазоном доминирующих частот, локализованных в разных временных интервалах; амплитудно- и/или частотно-модулированными спектральными компонентами; сингулярными волнообразными явлениями, наблюдаемыми в нейтральном ветре области мезосферы/нижней термосферы, и связанные, в основном, с крупномасштабными возмущениями, распространяющимися снизу [19, 20].

Модельные данные содержат поля гидродинамических величин вида $U(x, y, z, t)$ – зональный ветер, $V(x, y, z, t)$ – меридиональный ветер, $T(x, y, z, t)$ – температура. После Фурье разложения этих полей по долготе получаем временные ряды амплитуд и фаз отдельных зональных гармоник для всех гидродинамических величин. Далее с использованием комплексного вейвлет-преобразования Морле, получаем временные ряды амплитуд и фаз стоячих и распространяющихся на восток/запад планетарных волн, включая атмосферные приливы.

Так как вейвлет-преобразование является полосовым фильтром с известной функцией-ответом (функция вейвлета), с его помощью можно восстанавливать исходные временные ряды, учитывая только определенные гармоники. Восстановленный после преобразования временной ряд $x_n(t)$ может быть рассчитан по следующей полуэмпирической формуле:

$$x_n(t) = \frac{\delta_j \delta_t^{1/2}}{C_\delta \Psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\text{Re}\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}}, \quad (1)$$

где суммирование производится по всем масштабам (периодам), J – наибольший период, δt – обратный временной интервал, δj – интервал масштаба, $\text{Re}\{W_n(s_j)\}$ – реальная часть непрерывного вейвлет спектра мощности временного ряда, s_j – соответствующий период.

Эмпирические коэффициенты с советующими значениями для используемого вейвлета Морле: $C_\delta = 0,776$, $\delta j_0 = 0,6$, $\Psi_0(0) = \pi^{-1/4}$ преобразуют спектр мощности в амплитудный спектр и учитывают масштабирование энергии [21].

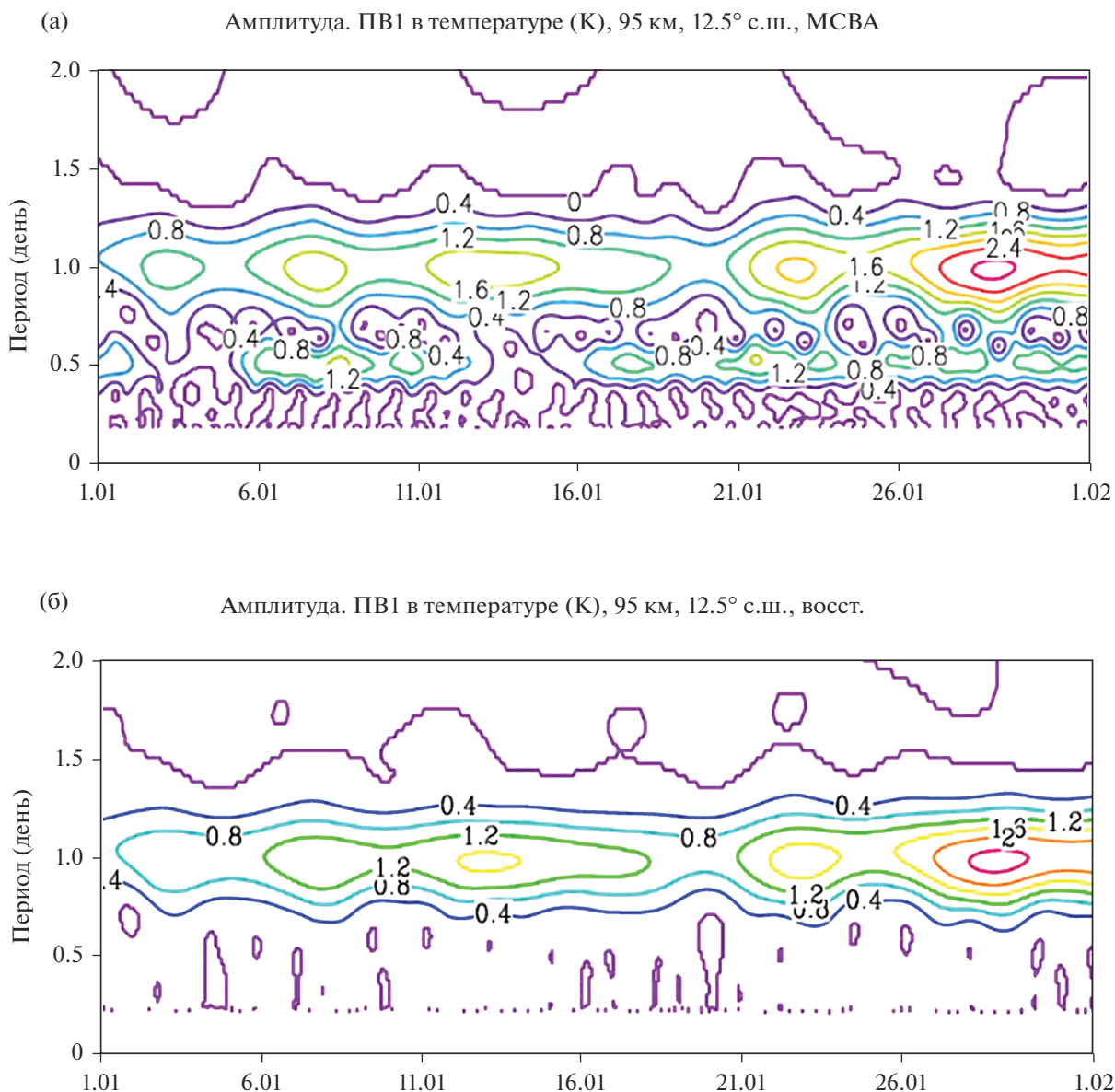


Рис. 1. Временная изменчивость амплитуды планетарной волны с $m = 1$ (ПВ1) на высоте 95 км, 12.5° с. ш., январь: а) – исходные данные, б) – восстановленные после вейвлет-преобразования для интервала периодов 0.7–1.25 (суточный мигрирующий прилив).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ АМЛИТУД И ФАЗ ОТДЕЛЬНЫХ ПРИЛИВНЫХ ГАРМОНИК

С использованием выражения (1) и данных МСВА были восстановлены поля температуры, зонального, меридионального ветра, вертикальной скорости и возмущения потенциального вихря Эртеля. Для примера на рис. 1–3 показана временная изменчивость амплитудных спектров поля температур атмосферного прилива на 12.5° с.ш. Результаты позволяют определить периоды восста-

новления данных не только для мигрирующих, но и для немигрирующих приливов. В дальнейшем можно проанализировать генерацию приливных компонент отдельно, используя отфильтрованные амплитуды и фазы. На рис. 1а и 3а наблюдаются немигрирующие приливы с периодом 12 ч $m = 1$ и $m = 3$, соответственно. Для восстановления амплитуд данных приливов необходимо задать периоды 0.3–0.7. На рис. 2а наблюдается немигрирующий прилив с периодом 24 ч и $m = 2$, для восстановления амплитуд которого необходимо задать периоды 0.7–1.2, а также немигрирующий прилив с $m = 2$ и периодом 8 ч. Для его вос-

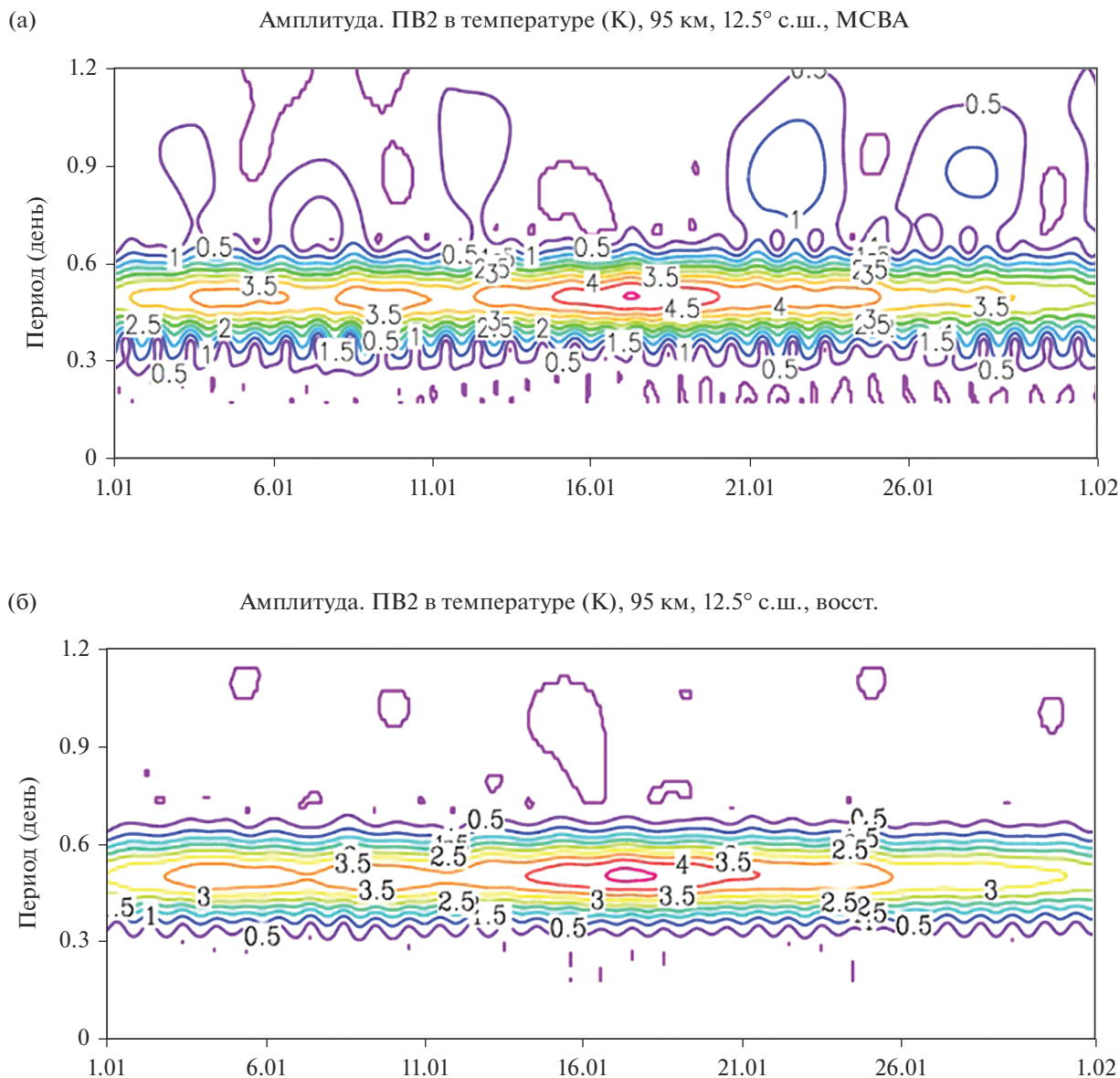


Рис. 2. Временная изменчивость амплитуды планетарной волны с $m = 2$ (ПВ2) на высоте 95 км, 12.5° с. ш., январь: а) – исходные данные, б) – восстановленные после вейвлет-преобразования для интервала периодов 0.25–0.7 (полусуточный мигрирующий прилив).

становления необходимо выбрать периоды 0.2–0.45. Немигрирующий прилив с $m = 1$ и периодом 8 ч не наблюдается.

Используя исходные и восстановленные поля температуры, зонального, меридионального ветра, вертикальной скорости и возмущения потенциального вихря Эртеля можно также построить широтно-высотные распределения амплитуд и фаз для атмосферных приливов. На рис. 4–6 представлены результаты за январь для поля зонального ветра мигрирующих приливов, а на рис. 7–8 – немигрирующих.

Восстановленные с помощью комплексного вейвлет-преобразования Морле поля температуры, зонального, меридионального ветра, вертикальной скорости и возмущения потенциального вихря Эртеля были использованы при исследовании нелинейных взаимодействий между отдельными приливными компонентами.

5. НЕЛИНЕЙНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Метод анализа нелинейных взаимодействий планетарных волн, в том числе солнечных тепло-

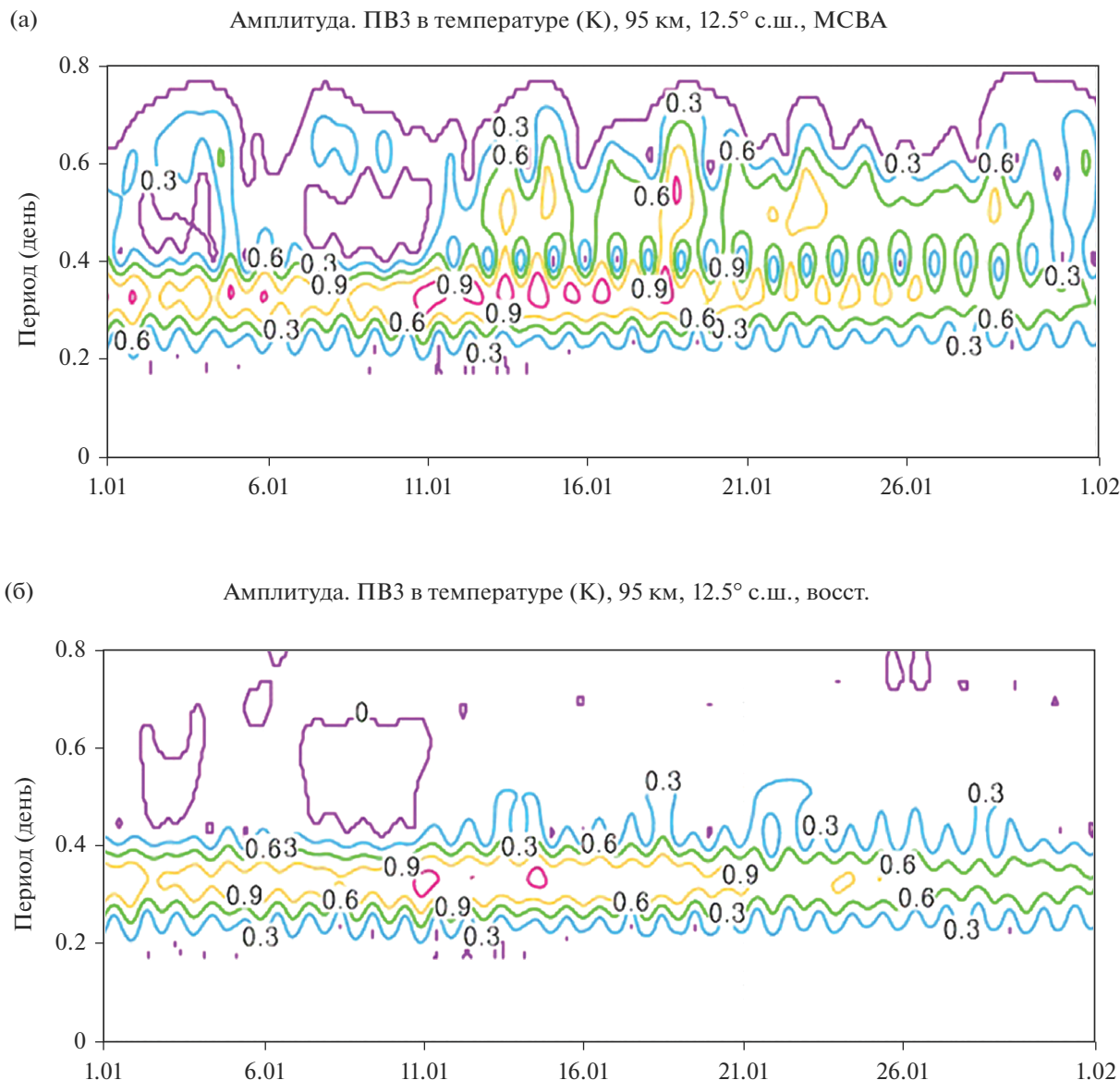


Рис. 3. Временная изменчивость амплитуды планетарной волны с $m = 3$ (ПВЗ) на высоте 95 км, 12.5° с. ш., январь: а) – исходные данные, б) – восстановленные после вейвлет-преобразования для интервала периодов 0.15–0.45 (восьмичасовой мигрирующий прилив).

вых приливов, основан на исследовании сохранения возмущенной потенциальной энтропии. В этом случае рассчитываются слагаемые, отвечающие за нелинейные взаимодействия в уравнении баланса потенциальной энтропии. Чтобы получить уравнение баланса, уравнения сохранения потенциального вихря Эртеля умножаются на его возмущение. Общий вид баланса возмущенной потенциальной энтропии в лог-изобарической системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\overline{P'^2} / 2 \right) = -\overline{P'(\vec{V}' \cdot \nabla' P')} - \overline{P'(\vec{V}' \cdot \nabla' \bar{P})} - \overline{P'(\vec{V}' \cdot \nabla' P')} + \overline{P'Q'}, \quad (2)$$

где P – потенциальный вихрь Эртеля, равный скалярному произведению абсолютной завихренности на градиент потенциальной температуры, разделенному на фоновую плотность; \vec{V} – вектор скорости ветра; Q' – вклад неадиабатических притоков тепла и/или диссипативных слагаемых. Черта сверху означает зональное осреднение, а штрихи – возмущения, т.е. отклонения от зонально осредненных значений. Слагаемое в левой части уравнения определяется как мера временной изменчивости волновой активности [22]. Первое и второе слагаемые в правой части описывают взаимодействия по типу волна-волна и волна-средний поток, соответственно. Следующее слагаемое отвечает за адвективный перенос потенциальной энтро-

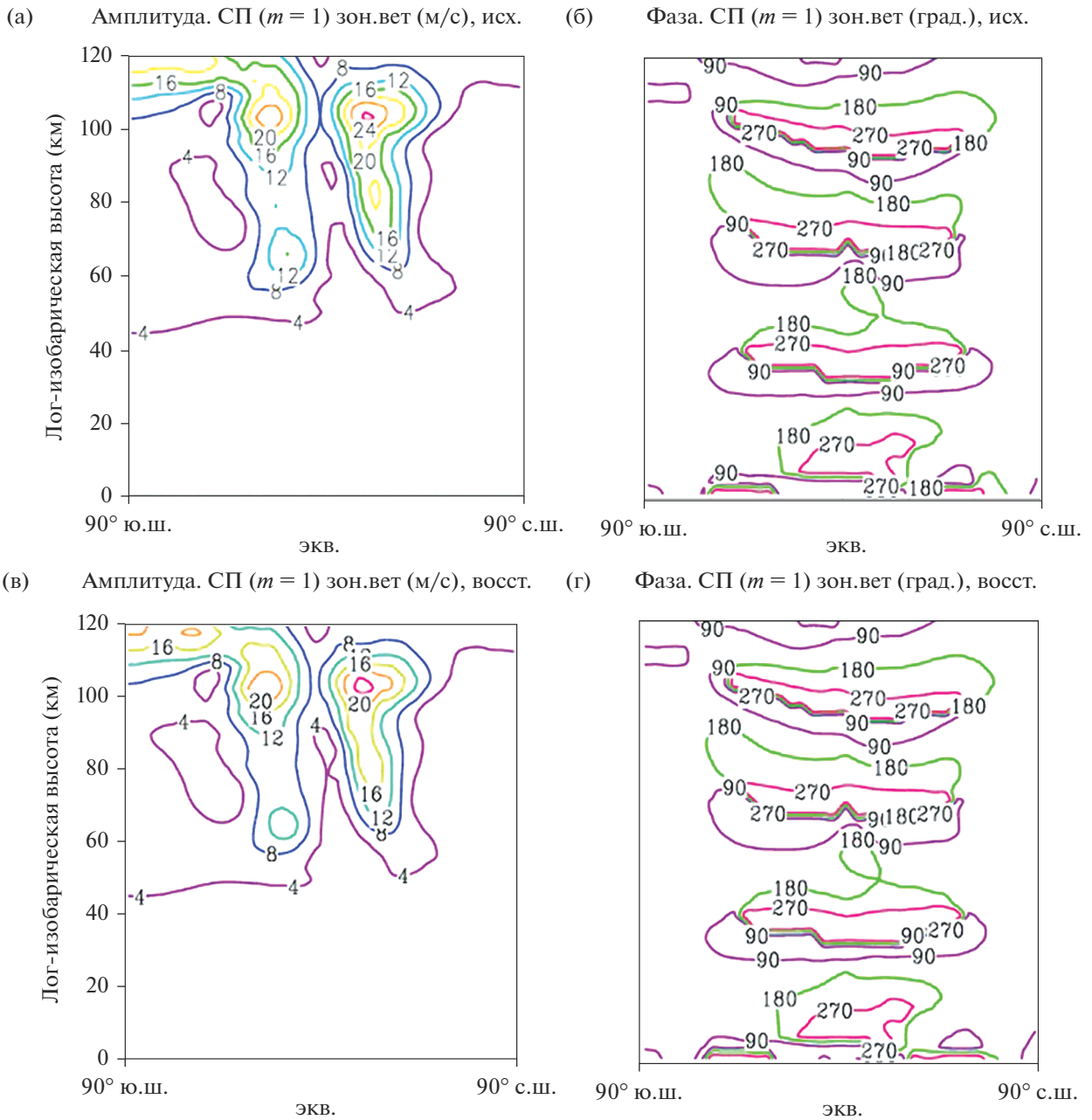


Рис. 4. Широтно-высотные распределения амплитуды и фазы суточного прилива, поле зонального ветра: (а) – амплитуда, исходные данные, (б) – фаза, исходные данные, (в) – амплитуда, восстановленные данные, (г) – фаза, восстановленные данные.

фии. Последнее в правой части описывает изменения возмущенной потенциальной энтропии из-за адиабатического нагрева. Это слагаемое также включает вклады в уравнение импульса от гравитационных и инерционно-гравитационных волн.

Учитывая метод генерации вторичных планетарных волн, показанный в работах [3, 23], уравнения, аналогичные уравнению 2 могут быть записаны для суточного и полусуточного мигрирующего прилива. Согласно этому методу, суточный мигри-

рующий прилив с $m_t = 1$ (СП) генерируется в результате нелинейного взаимодействия полусуточного мигрирующего прилива (ПП, $m_t = 2$) – СП, а также восьмичасового мигрирующего прилива (8 ч П, $m_t = 3$) с ПП; полусуточный мигрирующий прилив генерируется в результате самовзаимодействия СП и взаимодействия 8 ч П – СП. В результате уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии для суточного и полусуточного мигрирующих приливов, где подстрочные

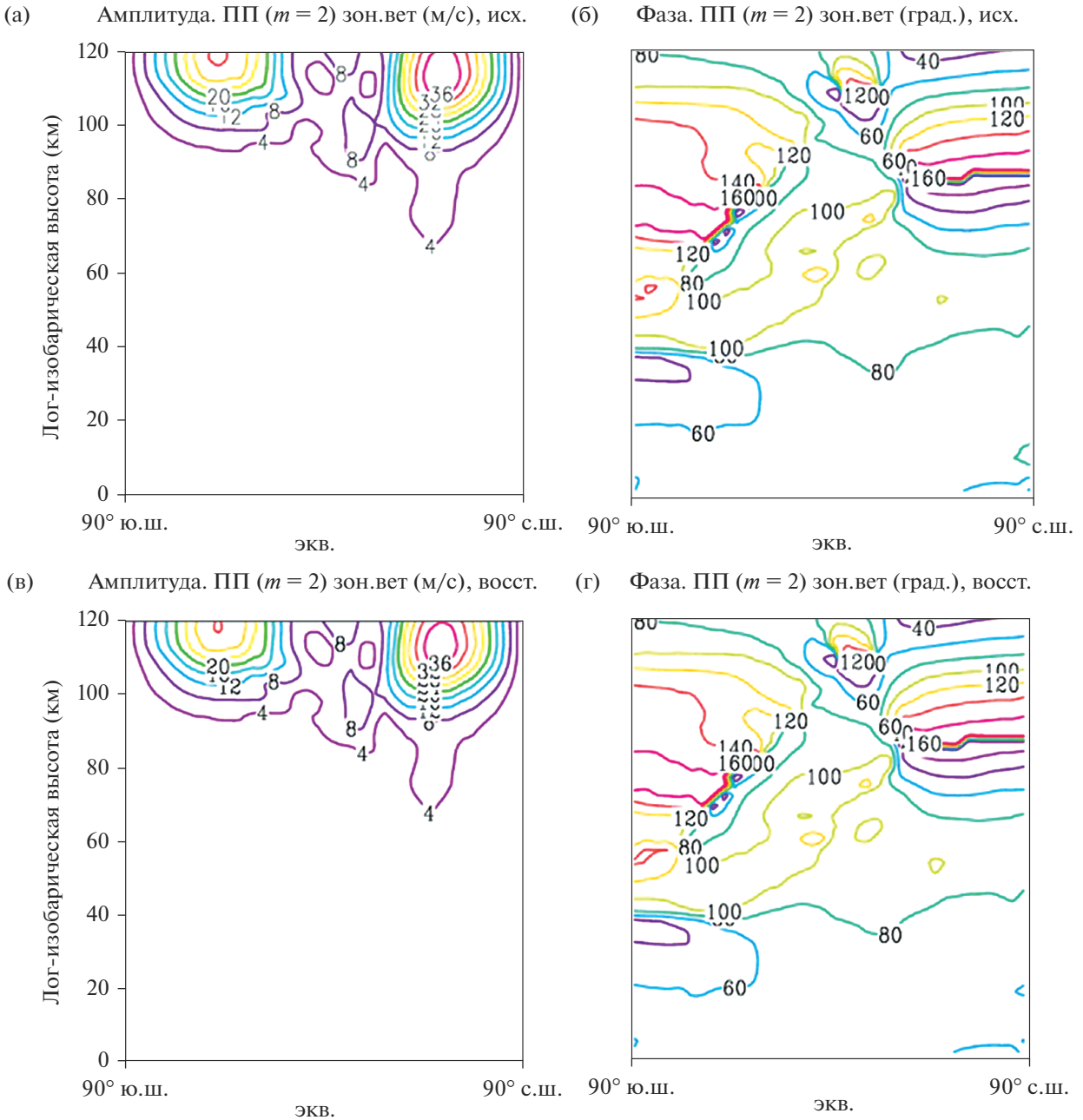


Рис. 5. Широтно-высотные распределения амплитуды и фазы полусуточного прилива, поле зонального ветра: (а) – амплитуда, исходные данные, (б) – фаза, исходные данные, (в) – амплитуда, восстановленные данные, (г) – фаза, восстановленные данные.

индексы обозначают зональное волновое число – уравнения 3 и 4, соответственно:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P_1'}{\partial t} = -P_1' (\overline{V_1' \cdot \nabla P_2'}) - P_1' (\overline{V_2' \cdot \nabla P_1'}) - P_1' (\overline{V_2' \cdot \nabla P_3'}) - P_1' (\overline{V_3' \cdot \nabla P_2'}) - P_1' (\overline{V_1' \cdot \nabla P}) - P_1' (\overline{V \cdot \nabla P_1'}) + P_1' R_1' \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial P_2'}{\partial t} = -P_2' (\overline{V_1' \cdot \nabla P_1'}) - P_2' (\overline{V_1' \cdot \nabla P_3'}) - P_2' (\overline{V_3' \cdot \nabla P_1'}) - P_2' (\overline{V_2' \cdot \nabla P}) - P_2' (\overline{V \cdot \nabla P_2'}) + P_2' R_2' \quad (4)$$

Амплитуды и фазы приливных компонент, полученные методом, указанным в разделе 2, использовались для анализа нелинейных взаимо-

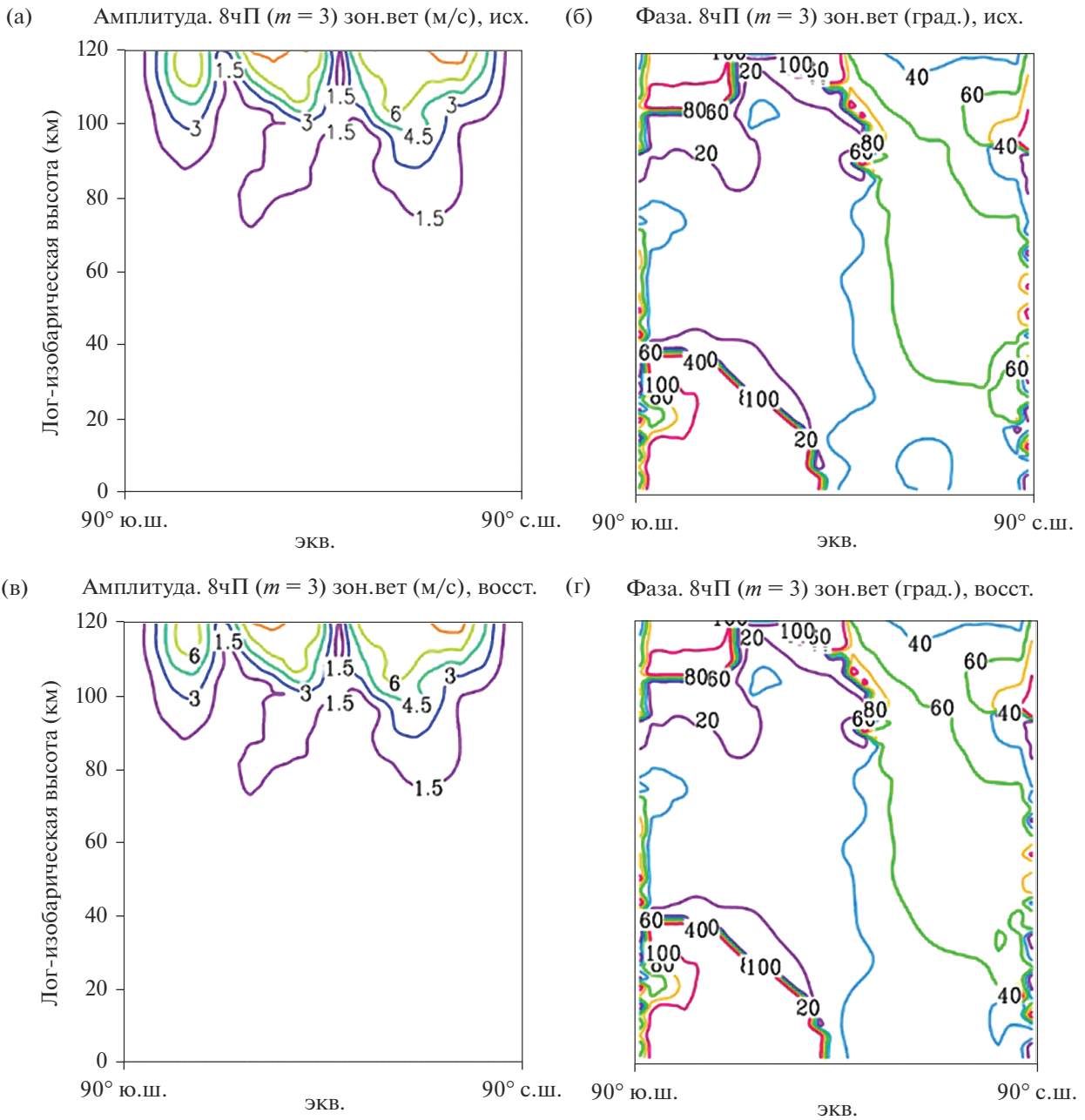


Рис. 6. Широтно-высотные распределения амплитуды и фазы восьмичасового прилива, поле зонального ветра: (а) – амплитуда, исходные данные, (б) – фаза, исходные данные, (в) – амплитуда, восстановленные данные, (г) – фаза, восстановленные данные.

действий между мигрирующими атмосферными приливами и средним потоком, а также между собой. На рис. 9–10 показаны результаты расчета слагаемых в уравнениях 3 и 4 на 95 км, усредненные по полосе широт 52.5–62.5° с.ш. с весом косинус широты. Панели (а) показывают временную изменчивость волновой активности; (б) и (в) – взаимодействие между мигрирующими приливами; (г) – взаимодействие между приливом и средним потоком. Значения по оси ординат приведены в

единицах $10^{12}(\text{кг} \cdot \text{м}^{-3})^2 \text{PVU}^2/\text{сут}$, где 1PVU (Potential Vorticity Unit) = $10^{-6} \text{К м}^2 \text{кг}^{-1} \text{с}^{-1}$.

Результаты расчета показывают, что на высоте 95 км вклад слагаемых, ответственных за нелинейное взаимодействие между приливами, сравним с вкладом остальных слагаемых. Таким образом, модельные данные, доступные до высот ионосферы имеют преимущество перед данными реанализа в приливных исследованиях. На результаты влияет

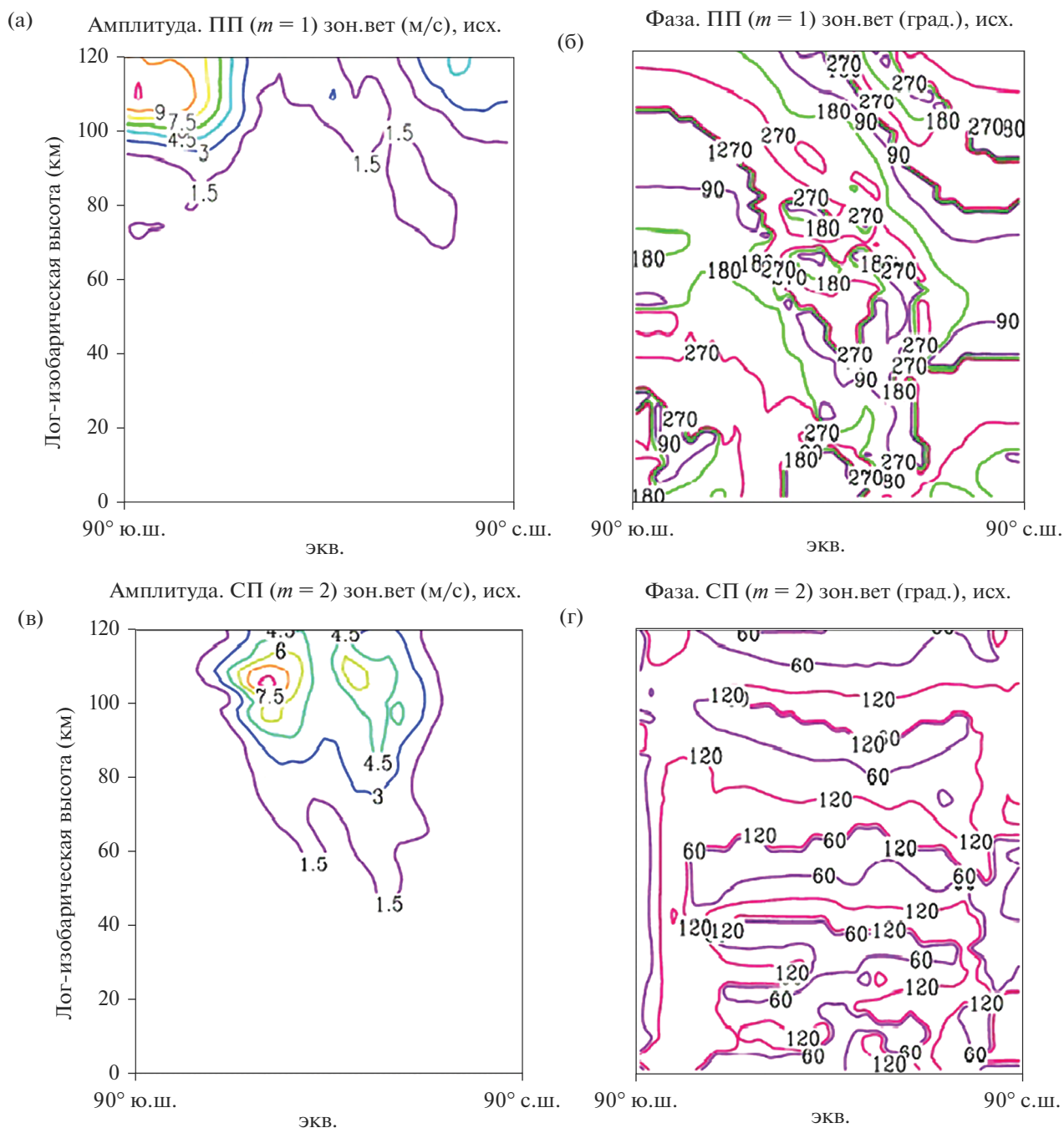


Рис. 7. Широтно-высотные распределения амплитуды – (а) и фазы – (б) полусуточного немигрирующего прилива; амплитуды – (в) и фазы – (г) суточного немигрирующего прилива, поле зонального ветра.

сильная изменчивость атмосферных приливов, особенно суточных. Уменьшение волновой активности суточного прилива, сопровождается увеличением полусуточного – рис. 9а и 10а, и изменения наблюдаются во время развития внезапного стратосферного потепления. Аналогичные результаты получены при анализе взаимодействия

волны со средним потоком – рис. 9г и 10г. Расчет взаимодействий по типу волна-волна показывает значительный вклад восьмичасового прилива в генерацию атмосферных приливов. Следует отметить, что генерация суточного прилива интенсивна до наступления стратосферного потепления, а полусуточного – во время его развития.

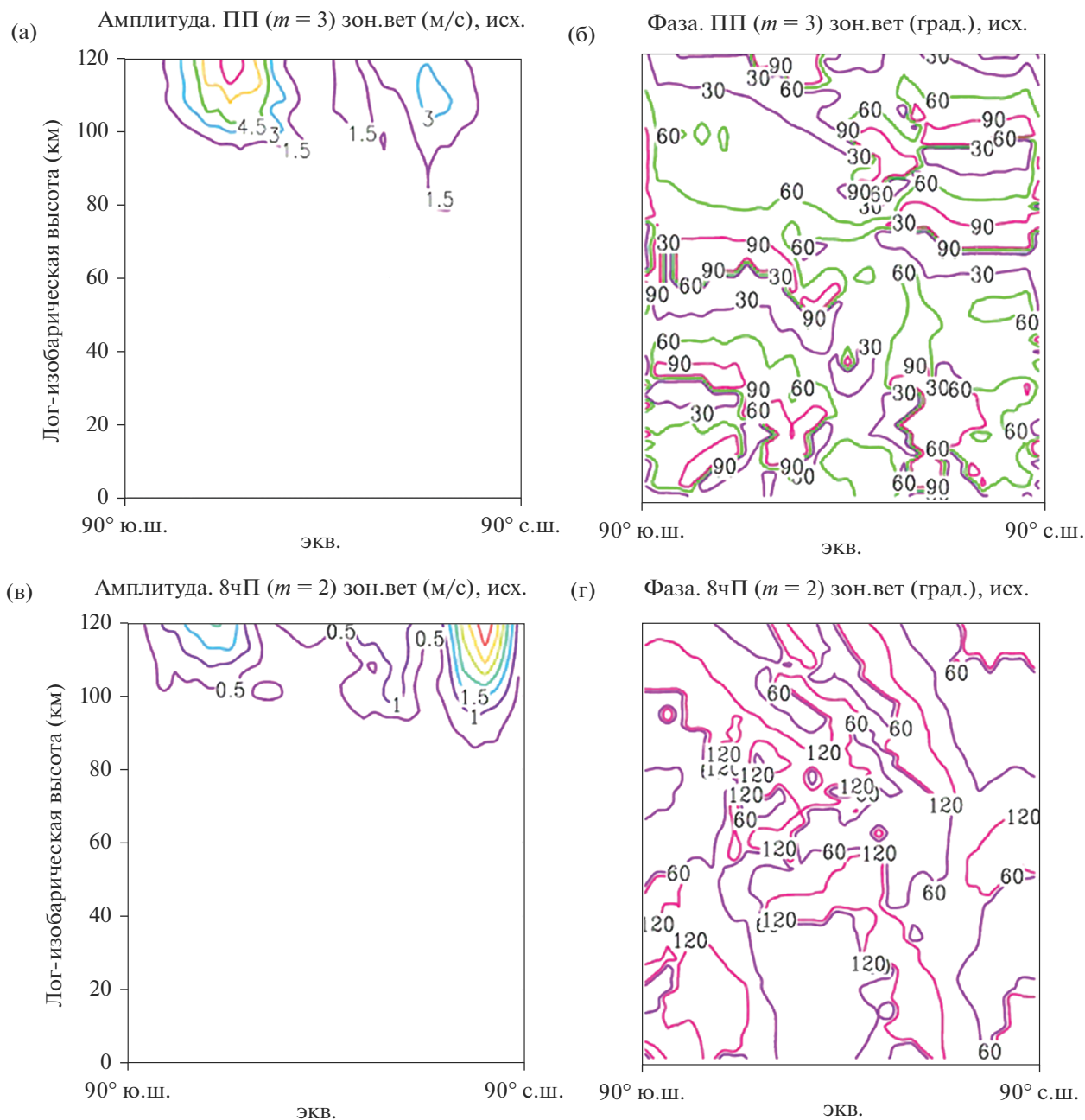


Рис. 8. Широтно-высотные распределения амплитуды – (а) и фазы – (б) полусуточного немигрирующего прилива; амплитуды – (в) и фазы – (г) восьмичасового немигрирующего прилива, поле зонального ветра.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием результатов численного моделирования исследуется нелинейное взаимодействие планетарных волн и изменчивость мигрирующих и немигрирующих приливов. Представлен метод, позволяющий получить амплитуды и фазы отдельных приливных составляющих с различными зональными волновыми числами и периодами. Результаты показывают, что комплексное вейвлет-

преобразование Морле можно использовать для восстановления не только радарных данных, но и модельных, и поля компонент скорости ветра, температуры и потенциального вихря Эртеля отлично восстанавливаются с заданными интервалами периодов. Были определены необходимые периоды для восстановления немигрирующих приливов. Также можно отметить, что максимальные амплитуды немигрирующих приливов (кроме вось-

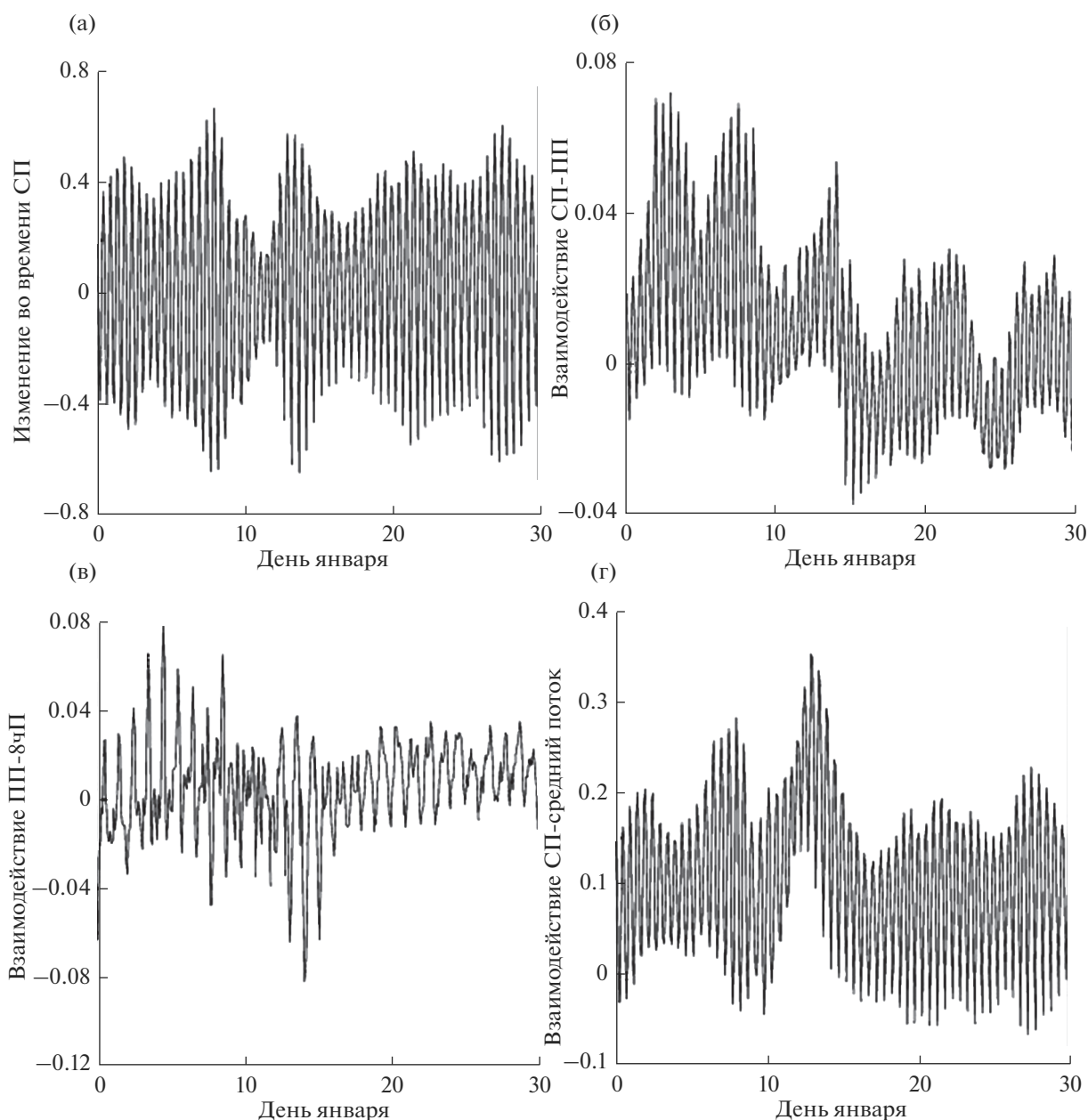


Рис. 9. Слагаемые, отвечающие за вклад в уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии для суточного мигрирующего прилива, МСВА, январь.

мического с $m = 2$), наблюдаются на уровнях верхней атмосферы, преимущественно в Южном полушарии.

Полученные амплитуды и фазы были использованы для расчета слагаемых в балансе возмущенной потенциальной энтропии, описывающих нелинейные взаимодействия между планетарными волнами. Показан вклад слагаемых, отвечающих за изменчивость волновой активности во времени, взаимодействие между волнами и взаимодействие волны со средним потоком. На уровнях мезо-

сферы/нижней термосферы вклад различных слагаемых в уравнение возмущенной потенциальной энтропии сравним. Отмечен вклад восьмичасового мигрирующего прилива в генерацию волновых движений. Кроме того, динамические явления в стратосфере, такие как внезапные стратосферные потепления, сопровождаются уменьшением волновой активности суточного прилива и увеличением полусуточной. Такой подход, полученные амплитуды и фазы могут быть использованы в исследовании генерации немигрирующих атмосферных

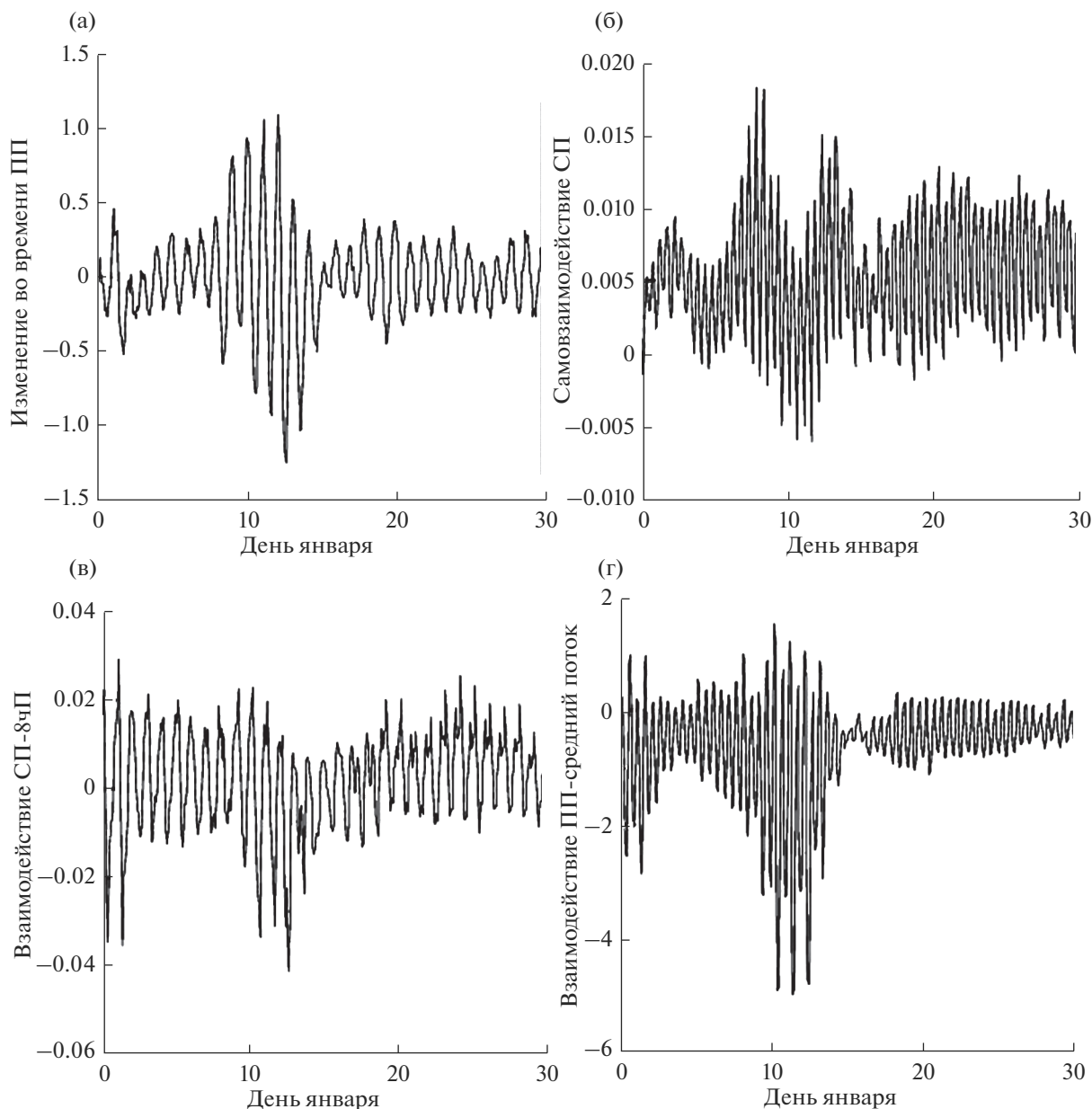


Рис. 10. Слагаемые, отвечающие за вклад в уравнение баланса возмущенной потенциальной энтропии для полусуточного мигрирующего прилива, МСВА, январь.

тепловых приливов. Это будет предметом дальнейших исследований.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 20-77-10006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baldwin M., Ayarzagueno B., Birner T., Butchart N., Butler A., Charlton-Perez A., Domeisen D., Garfinkel C., Garny H., Gerber E., Hegglin M., Langematz U., Pedatella N. Sudden Stratospheric Warmings // Review of Geophysics. 2021. V. 58. P. 1–37.
2. Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпечко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 1. С. 39–46.
3. Диденко К.А., Ермакова Т.С., Коваль А.В., Погорельцев А.И. Диагностика нелинейный взаимодействий стационарных планетарных волн // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 19–29.
4. Didenko K.A., Pogoreltsev A.I., Ermakova T.S., Shved G.M. Nonlinear interactions of stationary planetary waves during February 2016 sudden stratospheric warming // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. № 386. P. 1–7.
5. Baldwin M., Birner T., Brasseur G., Burrows J., Butchart N., Garcia, R. Geller, M. Gray, L. Hamilton K.,

- Harnik N., Hegglin M., Langematz U., Robock A., Sato K., Scaije A.* 100 Years of Progress in Understanding the Stratosphere and Mesosphere // *Meteorological Monographs*. 2019. V. 59(27). P. 27.1–27.61.
6. *Швед Г.М.* Введение в динамику и энергетику атмосферы. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2020. 396 с.
 7. *Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 2083–2101.
 8. *Суворова Е.В., Погорельцев А.И.* Моделирование немигрирующих приливов в средней атмосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. Т. 51. № 1. С. 107–118.
 9. *Davis R.N., Du J., Smith A.K., Ward W.E., Mitchell N.J.* The diurnal and semidiurnal tides over Ascension Island (88S, 148W) and their interaction with the stratospheric quasi-biennial oscillation: Studies with meteor radar, eCMAM and WACCM // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 9543–9564.
 10. *Becker E.* Mean-flow effects of thermal tides in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Atmos. Sci.* 2017. V. 74 P. 2043–2063.
 11. *Medvedeva I.V., Semenov A. I., Pogoreltsev A. I., Tatarsnikov A.V.* Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. V. 187. P. 22–32.
 12. *Portnyagin Y.I., Forbes J.M., Makarov N.A., Merzlyakov E.G., Palo S.* The summertime 12-h wind oscillation with zonal wavenumber $s = 1$ in the lower thermosphere over the South Pole // *Ann. Geophysicae*. 1998. V. 16. P. 828.
 13. *Dempsey S.M., Hindley N.P., Moffat-Griffin T., Wright C.J., Smith A.K., Du J., Mitchell N.J.* Winds and tides of the Antarctic mesosphere and lower thermosphere: One year of meteor-radar observations over Rothera (68° S, 68° W) and comparisons with WACCM and eCMAM // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. V. 212. P. 1.
 14. *Fröhlich K., Pogoreltsev A.I., Jacobi Ch.* Numerical simulation of tides, Rossby and Kelvin waves with the COMMA-LIM Model // *Adv. Space Res.* 2003. V. 32. P. 863–868.
 15. *Fröhlich K., Pogoreltsev A.I., Jacobi Ch.* The 48-Layer COMMA-LIM Model // *Report Inst. Meteorol. Univ. Leipzig*. 2003. № 30. P. 157–185.
 16. *Gavrilov N.M., Pogoreltsev A.I., Jacobi Ch.* Numerical modeling of the effect of latitude-inhomogeneous gravity waves on the circulation of the middle atmosphere // *Izv. Akad. Nauk, Fiz. Atmos. Okeana*. 2005. 41. С. 12–21.
 17. *Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Fröhlich K., Jacobi Ch.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 2083–2101.
 18. *Ermakova T.S., Aniskina O.G., Statnaia I.A., Motsakov M.A., Pogoreltsev A.I.* Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // *Earth, Planets and Space*. 2019. 71:8. P. 1–9.
 19. *Pancheva D., Beard A.G., Mitchell N.J.* Nonlinear interactions between planetary waves in the mesosphere/lower-thermosphere region // *J. Geophys. Res.* 2000. V.105. № A1. P. 157–170.
 20. *Chen C., Chu X.* Two-dimensional Morlet wavelet transform and its application to wave recognition methodology of automatically extracting two-dimensional wave packets from lidar observations in Antarctica // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2017. V. 162. P. 28–47.
 21. *Torrence C., Compo P.G.* A Practical Guide to Wavelet Analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. V. 79. P. 65–67.
 22. *White I.P., Hua L., Mitchell N.J., Phillips T.* Dynamical response to the QBO in the Northern winter stratosphere: signatures in wave forcing and eddy fluxes of potential vorticity // *J. Atmos. Sci.* 2015. V. 72. P. 4487–4507.
 23. *Pogoreltsev A.I.* Numerical simulation of secondary planetary waves arising from the nonlinear interaction of the normal atmospheric modes // *Phys. Chem. Earth (Part C)*. 2001. V. 26. № 6. P. 395–403.

Application of the Complex Wavelet Transform to Planetary Waves Study

K. A. Didenko^{1, 2, *} and A. I. Pogoreltsev^{1, 2}

¹ Russian State Hydrometeorological University, Voronezhskaya st. 79, St Petersburg, 192007 Russia

² St Petersburg University, Ulyanovskaya st. 1, St Petersburg, 198504 Russia

*e-mail: didenko.xeniya@yandex.ru

The method to study the variability of atmospheric migrating and nonmigrating tides, using the complex Morlet wavelet transform is considered. Such an approach allows to obtain the amplitudes and phases of individual tidal components with different zonal wavenumbers and periods. The most suitable periods for data wavelet transform were specified. The results obtained have been used in the analysis of nonlinear interactions between stationary planetary waves and atmospheric tides.

Keywords: planetary waves, atmospheric tides, wavelet transform, nonlinear interactions