

УДК 551.511.3; 551.511.31; 551.558.21; 551.513.27

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2017 г. Н. М. Гаврилов^{1,*}, А. В. Коваль^{1,**},
А. И. Погорельцев², Е. Н. Савенкова¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

²Российский государственный гидрометеорологический университет
195196 Санкт-Петербург, Малоохтинский просп., 98

*E-mail: n.gavrilov@spbu.ru,

**E-mail: koval_spbu@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2016 г.

После доработки 27.12.2016 г.

Параметризации нормальных атмосферных мод (НАМ) и орографических гравитационных волн (ОГВ) включены в механистическую модель общей циркуляции средней и верхней атмосферы, проведены численные эксперименты развития внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в январе–феврале с использованием данных реанализа метеорологической информации UK MET Office, осредненных за годы с восточными фазами квазидвухлетних колебаний (КДК) с 1992–2011 гг. Моделирование показало, что амплитуды ОГВ увеличиваются на высотах, больших чем 30 км в Северном полушарии после ВСП. Амплитуды ОГВ максимальны на высотах около 50 км, над североамериканскими и европейскими горными системами перед и во время ВСП, а также над Гималаями после потепления. На высоких широтах Северного полушария наблюдаются значительные (до 50–70%) вариации амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ) во время и после ВСП. Распространяющиеся на запад НАМ имеют локальные максимумы амплитуд не только в Северном, но и в Южном полушарии, где существуют волноводы для распространения этих мод. Рассчитанные изменения амплитуд СПВ и НАМ соответствуют изменениям средней температуры и ветра, потоков Элиассена–Пальма и показателя преломления атмосферы для планетарных волн в течение ВСП. Включение параметризации эффектов ОГВ приводит к увеличению амплитуд (до 30–70%) почти всех СПВ перед и во время ВСП и их уменьшению (до 20–100%) после ВСП на средних и высоких широтах северного полушария.

Ключевые слова: моделирование циркуляции, средняя и верхняя атмосфера, планетарные волны, орографические гравитационные волны, параметризация, внезапное стратосферное потепление.

DOI: 10.7868/S0003351517060022

1. ВВЕДЕНИЕ

Внезапные стратосферные потепления (ВСП) являются одними из наиболее заметных проявлений динамических взаимодействий тропосферы и средних слоев атмосферы. Эти явления проявляются в резких и значительных возрастаниях температуры (до 30–40 К) вблизи Северного полюса на высотах 30–50 км и ослаблением или даже разворотом западного полярного циркумполярного вихря [1, 2]. Формированию ВСП могут способствовать неустойчивые планетарные волны (ПВ), распространяющиеся вверх из тропосферы [3–5].

В последние годы в науке отмечается растущий интерес к исследованию ВСП (например, [6–8]). Явления ВСП в значительной мере влияют на динамику и энергетику верхних слоев атмосферы

[9–12] и, соответственно, могут оказывать воздействие на космическую погоду. Несмотря на растущий интерес к изучению ВСП, открытыми остаются многие вопросы, касающиеся механизма формирования ВСП [13] и их влияния на планетарные и гравитационные волны [14].

Перенос кинетической энергии и импульса внутренними волнами является необходимым условием для взаимодействия между динамическими процессами в нижних и средних слоях атмосферы [15, 16]. Численные модели температурного режима и глобальной циркуляции средних слоев атмосферы учитывают притоки тепла и ускорения, создаваемые диссипирующими внутренними волнами [17, 18]. Важным источником внутренних атмосферных волн является рельеф земной

поверхности [19]. Численные эксперименты, посвященные воздействию гравитационных волн на глобальную циркуляцию, амплитуды приливов и на их сезонные изменения, описаны в статьях [20–23]. Неравномерность и нестабильность процесса возникновения гравитационных волн и условий их распространения в средние слои атмосферы обуславливает генерацию различных мод ПВ (например, [24–26]). Гаврилов и др. [27] включили параметризацию динамических и тепловых эффектов ОГВ в механистическую численную циркуляционную модель средней и верхней атмосферы (МСВА). Было показано, что ОГВ могут существенно влиять на глобальную циркуляцию в средних и верхних слоях атмосферы. В работе [28] авторы промоделировали изменения амплитуд ПВ, вызванные воздействием ОГВ.

В данном исследовании проведены численные эксперименты для изучения взаимодействия ПВ и ОГВ в средней атмосфере во время ВСП. В модель МСВА включена параметризация нормальных атмосферных мод (НАМ) и проанализированы изменения амплитуд стационарных планетарных волн (СПВ) и распространяющихся на запад НАМ во время 11-дневных временных интервалов перед, во время и после ВСП с включением и без включения параметризации эффектов ОГВ для климатологических условий, типичных для января–февраля.

2. МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ МСВА И ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ОГВ

Для изучения воздействия ОГВ на характеристики ПВ во время событий ВСП мы провели численный эксперимент с использованием модели МСВА, описанной Погорельцевым [29]. В данном исследовании мы использовали поля распределения метеопараметров, усредненные за январь–февраль для всех лет с восточными фазами КДК в течение 1992–2011 гг. согласно списку “восточных” и “западных” фаз [30, 31]. МСВА может воспроизводить СПВ и распространяющиеся НАМ. На нижней границе амплитуды СПВ оцениваются на основании данных о геопотенциальных высотах в нижних слоях атмосферы, взятых из вышеуказанных метеорологических данных UK Met Office.

Для параметризации источников НАМ авторы [32] добавили в уравнение теплового баланса МСВА дополнительные слагаемые, которые содержат ряд синусоидальных компонент с зональными волновыми числами $m = 1$ и $m = 2$ и периодами, соответствующими анализируемому НАМ. Периоды НАМ соответствуют резонансному отклику нижней атмосферы на волновые колебания [32]. Используемая версия МСВА включает в себя распространяющиеся на запад НАМ (1,1), (1,2),

(2,1) и (2,2) по классификации [33]. Они имеют резонансные периоды в 120, 220, 90 и 170 часов соответственно. Указанные источники обеспечивают амплитуды моделируемых НАМ, сопоставимые с наблюдаемыми в стратосфере [34]. Параметризация динамических и тепловых эффектов ОГВ с наблюдаемыми частотами $\sigma = 0$ была описана [35].

Численные эксперименты с МСВА были выполнены для двух случаев: с включением и без включения параметризации ОГВ. Проанализированы моды СПВ с зональными волновыми числами $m = 1$ –4 и НАМ западного направления с $m = 1$ и $m = 2$, имеющие периоды 5, 10 и 4, 7 сут соответственно, а также их изменения за счет воздействия ОГВ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Характеристики ПВ, вызванные воздействием орографических волн, моделируются для трех 11-дневных интервалов перед, во время и после ВСП в средней атмосфере.

3.1. Изменения среднезональных характеристик

Расчеты по МСВА для климатически осредненных фоновых метеорологических полей (см. п. 2) показывают резкий рост моделируемой температуры на 15–20 К вблизи Северного полюса с одновременным разворотом средней зональной скорости на широте 62° N на высотах, больших 25–30 км в конце января, что характерно для главного (“major”) ВСП. Аналогичное потепление наблюдалось по данным UK Met. Office в январе–феврале 2001 г. Моделирование показало, что во время ВСП происходит увеличение амплитуды ПВ с зональным волновым числом $m = 1$ на высоте выше 30 км, и уменьшение амплитуды после завершения ВСП. В таблице приведены временные интервалы, соответствующие условиям перед, во время и после модельного среднеклиматического ВСП. Таблица показывает, что включение параметризации эффектов ОГВ приводит к более раннему (на 20 сут) развитию ВСП.

На рис. 1 показаны высотно-широтные распределения зонального ветра, отклонений температуры от ее 2-месячных средних значений, а также амплитуды ОГВ для 11-дневных интервалов перед, во время и после ВСП, рассчитанные по МСВА и осредненные по долготе. Структура зональной циркуляции, представленная на рис. 1а, соответствует эмпирическим моделям [36, 37]. Средний рис. 1а показывает значительное ослабление среднезонального струйного течения в высоко-широтной северной страто-мезосфере во время ВСП. (см. правый рис. 1а). Это струйное течение снова возрастает после ВСП, но остается более слабым, чем было перед ВСП (см. левый рис. 1а). Это может

Временные интервалы, используемые для оценки параметров ПВ перед, во время и после ВСП, моделируемых с учетом и без учета параметризации ОГВ в модели МСВА

	Перед ВСП	Во время ВСП	После ВСП
С учетом ОГВ	6–16 января	19–29 января	4–14 февраля
Без ОГВ	18–28 января	8–18 февраля	20 февраля- 2 марта

быть связано с сезонной перестройкой зональной циркуляции в конце зимы.

Средний рис. 1б показывает увеличение температуры вблизи Северного полюса во время ВСП, достигающее 15 К на высотах 30–50 км. Выше 60 км на рис. 1б видно уменьшение приполярной температуры до -10 К во время ВСП. Правый рис. 1в показывает увеличение амплитуды ОГВ на высотах более 30 км после ВСП. Анализ рассчитанных горизонтальных распределений зонального

ветра показывает, что области максимальных значений среднего восточного ветра расположены на средних широтах над Северной Америкой и Европой перед и во время ВСП. После ВСП области максимальных значений зональных ветров сдвигаются на восток. Поэтому на высотах больше 50 км перед и во время ВСП большие амплитуды имеют ОГВ над горными системами Северной Америки и Европы, а после ВСП становятся сильнее ОГВ над Гималаями.

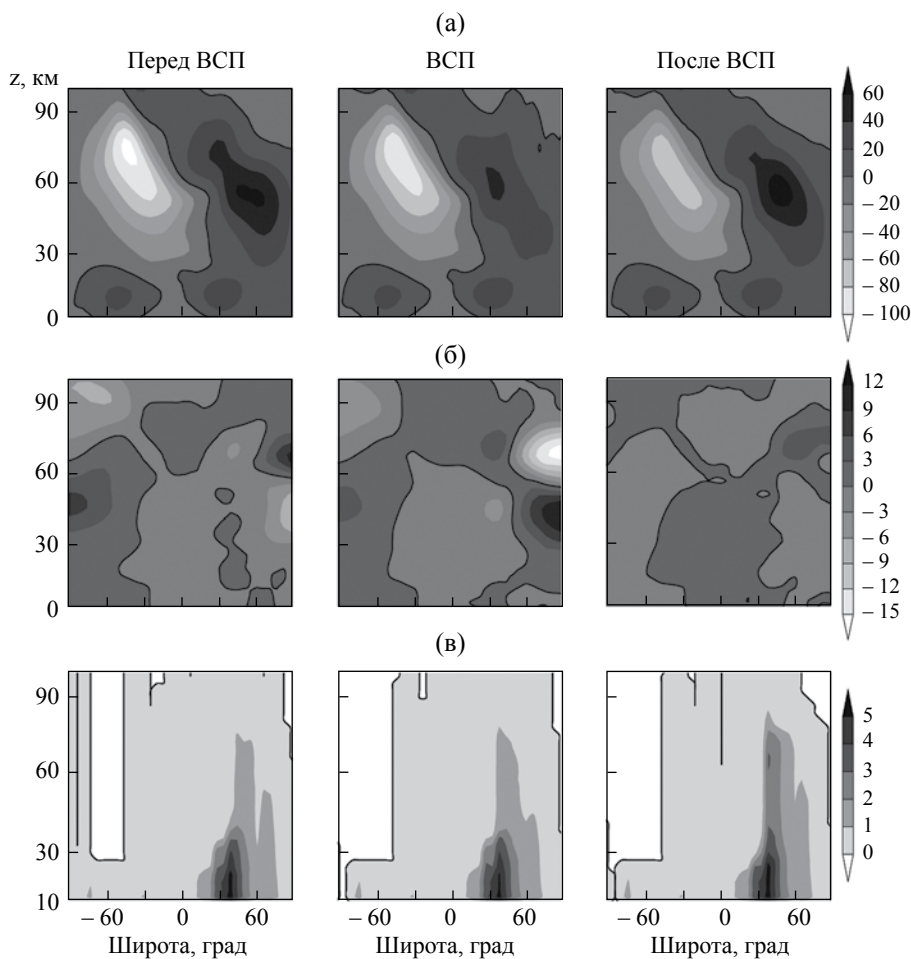


Рис. 1. Широтно-высотные распределения среднезонального зонального ветра (м/с) (а), отклонений среднезональной температуры от двухмесячного среднего значения (К) (б) и амплитуды скорости ОГВ (м/с) (в), рассчитанные в модели МСВА и осредненные за 11-дневные временные интервалы перед (слева) во время (в середине) и после (справа) ВСП (см табл.).

3.2. Амплитуды планетарных волн

Для анализа изменений ПВ во время ВСП сделано разложение в ряды Фурье по долготе метеорологических полей, моделируемых по МСВА с включенной параметризацией ОГВ. Определены параметры стационарных планетарных волн с зональными числами $m = 1-4$ (обозначаемые ниже как СПВ1 – СПВ4) и нормальных атмосферных мод, распространяющихся на запад (см.п. 2), как это было предложено [38].

На рис. 2 показаны амплитуды вариаций геопотенциальной высоты СПВ1 – СПВ4 для временных интервалов из таблицы. Видно, что в январе

амплитуды СПВ больше в Северном (зимнем) полушарии, где зональная циркуляция имеет восточное направление на всех высотах (см. рис. 1а) и создает волноводы для распространения планетарных волн (см. ниже). Средний рис. 2а показывает рост амплитуды СПВ1 на высоте 30–40 км в районе Северного полюса во время ВСП. Взаимодействие СПВ1 со средним струйным течением, показанное на рис. 2а, может вызвать смену направления ветра на высоких широтах с западного на восточное.

Рисунок 2б показывает, что на высотах 50–70 км в Северном полушарии амплитудный максимум

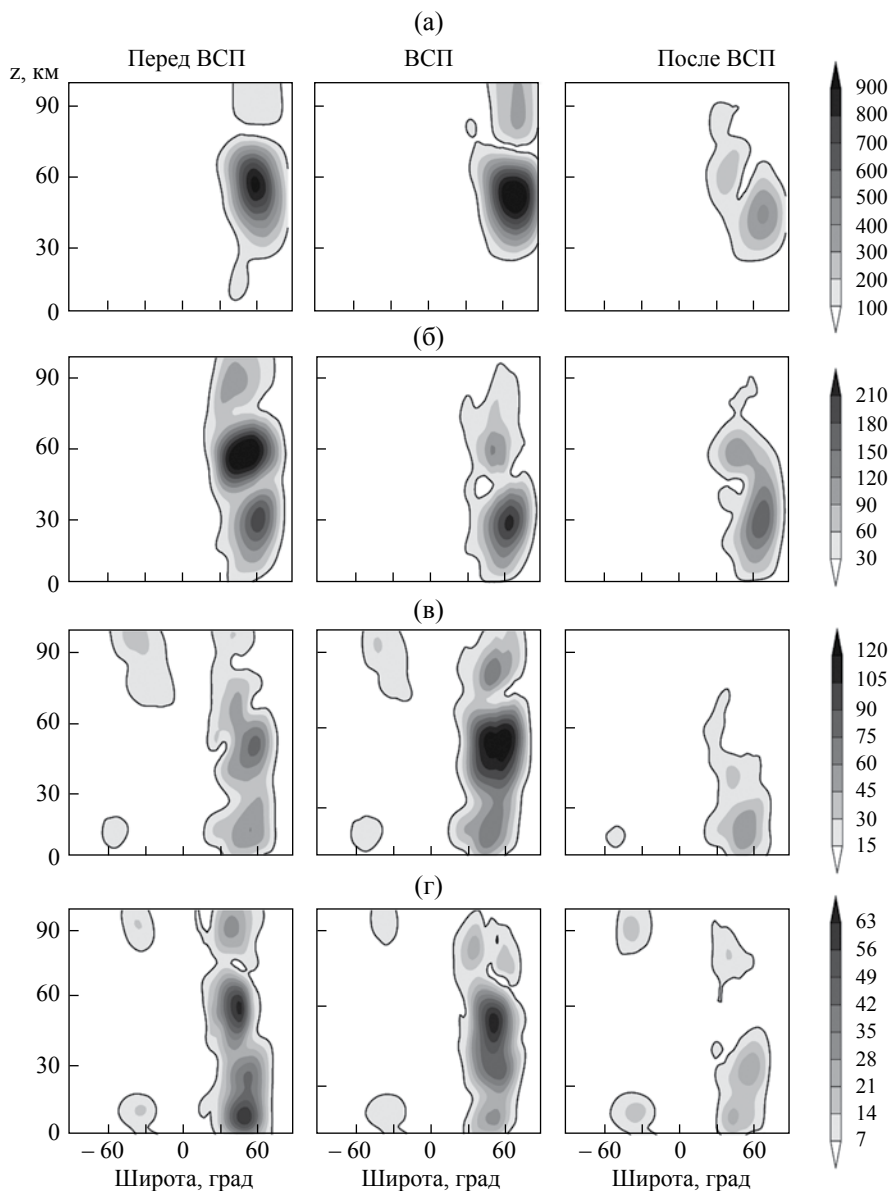


Рис. 2. Амплитуды вариаций геопотенциала (г.п.м.), вызванные СПВ с зональными волновыми числами $m = 1, 2, 3, 4$ (а, б, в, г), перед (слева), во время (в середине) и после (справа) ВСП (см табл. 1).

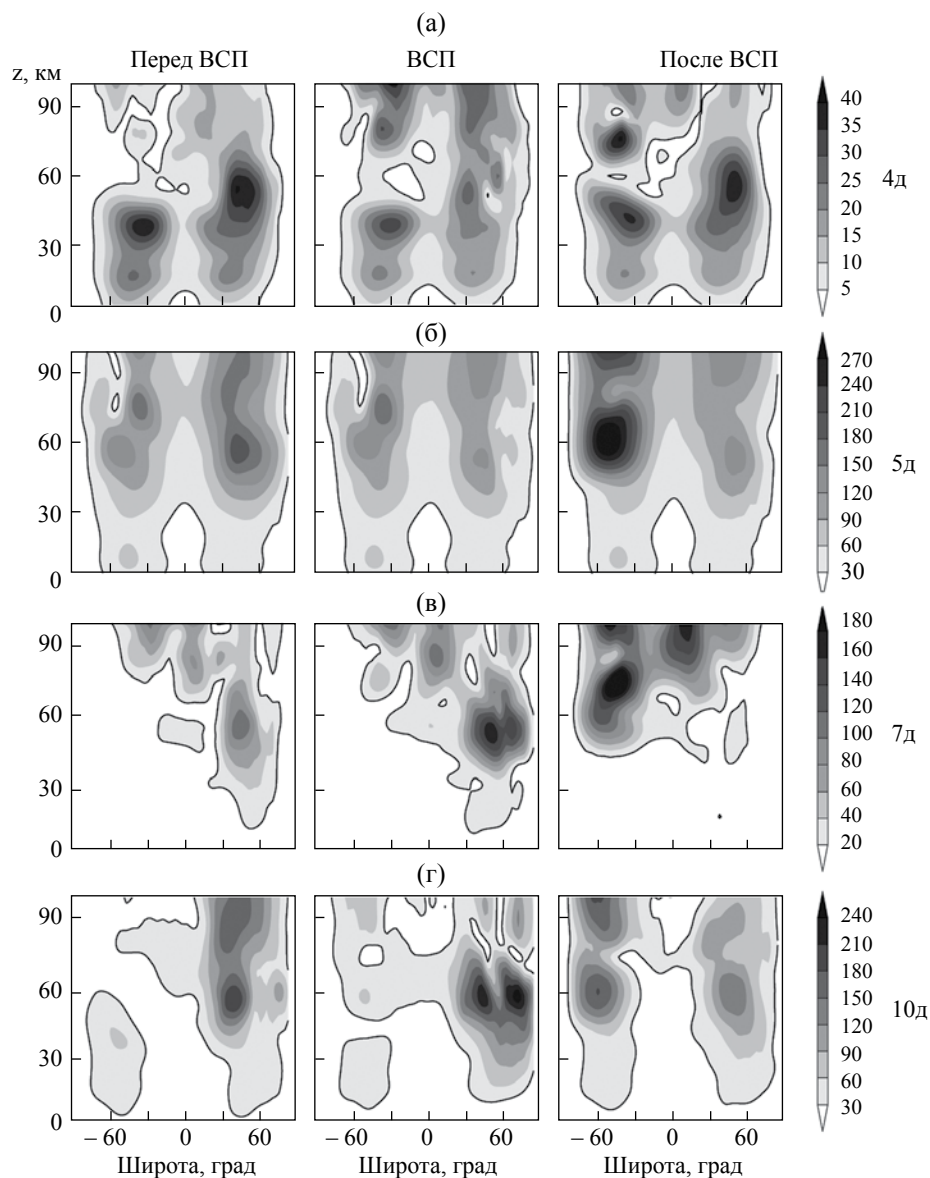


Рис. 3. Амплитуды вариаций геопотенциала (г.п.м.), вызванные распространяющимися на запад НАМ с $\tau = 4$ сут, $m = 2$ (а); $\tau = 5$ сут, $m = 1$ (б); $\tau = 7$ сут, $m = 2$ (в); $\tau = 10$ сут, $m = 1$ (г), перед (слева), во время (в середине) и после (справа) ВСП (см табл.).

СПВ2 с $m = 2$ увеличивается перед ВСП и уменьшается во время и после ВСП. Максимум амплитуды СПВ2 на высотах 20–40 км на рис. 2б усиливается во время ВСП и может способствовать образованию температурных и ветровых структур с двумя максимумами и минимумами вдоль широтного круга, которые выявлены при анализе горизонтальных распределений соответствующих моделируемых полей во время ВСП. Относительные изменения амплитуд СПВ1 и СПВ2 во время ВСП могут быть вызваны нелинейными взаимодействиями между модами ПВ и изменениями их фаз. Рисунки 2в и 2г демонстрируют увеличение

амплитуд СПВ3 и СПВ4 в Северном полушарии во время ВСП. Правые рис. 2 показывают общее уменьшение амплитуд всех ПВ после завершения ВСП, что может быть вызвано трансформациями фоновых ветров и температурных полей, которые влияют на условия распространения СПВ.

На рис. 3 изображены амплитуды вариаций геопотенциала, создаваемые модами НАМ с разными периодами, распространяющимися на запад. Особенности рис. 3 являются максимумы амплитуд НАМ не только в Северном, но и в Южном полушарии, где распространяющиеся на запад НАМ могут иметь волноводы для своего распространения (см.п. 3.3). На

средних и высоких широтах Северного полушария на рис. 3 амплитуды 4- и 5-суточных НАМ уменьшаются, а амплитуды 7- и 10-суточных НАМ увеличиваются во время ВСП. На высотах больше 40 км после окончания ВСП амплитуды НАМ в Южном полушарии возрастают (см. правые рис. 3). Это может быть результатом сезонной перестройки глобальной атмосферной циркуляции, показанной на рис. 1а, которая делает среднюю атмосферу Южного полушария более “прозрачной” для распространяющихся на запад НАМ.

3.3. Показатели преломления ПВ и потоки Элиассена–Пальма

Области атмосферы, в которых фоновая температура и ветер создают условия для распространения ПВ, рассматриваются как их волноводы. Авторы Дикинсон, [39], Мацуно [40] ввели показатель преломления атмосферы для ПВ и показали, что планетарные волны лучше всего распространяются в областях его положительных значений. Для исследования структуры волноводов ПВ во время ВСП использованы формулы для вычисления квадрата среднезонального квазигеострофического показателя преломления n_m^2 для волновых мод с зональным волновым числом m [15, 41, 42]. Теория планетарных волн предполагает, что волны способны распространяться вверх в атмосферных областях, где $n_m^2 > 0$, или затухать в регионах, где $n_m^2 < 0$. Таким образом, волноводы атмосферных ПВ ограничены областями, в которых n_m^2 меняет знак. Эти поверхности располагаются около критических уровней ПВ.

Еще одной важной характеристикой ПВ является вектор потока Элиассена–Пальма $\mathbf{F}_m = (F_m^{(\phi)}, F_m^{(z)})$ (поток ЭП). Оценки этого потока в данном исследовании выполнены по стандартным формулам (см. [15, 41]). Дивергенция потока ЭП определяет ускорение среднезонального потока, создаваемое ПВ.

Были рассчитаны широтно-высотные распределения положительных n_m^2 для СПВ1–4. Более благоприятные условия распространения СПВ существуют на средних широтах Северного полушария, где потоки ЭП направлены вверх на малых высотах и поворачивают к экватору в стратосфере. Это согласуется с существующими исследованиями потоков ЭП (например, [30, 42, 43]). Анализ показывает, что потоки ЭП в средней атмосфере максимальны для СПВ1. Увеличение m приводит к уменьшению величин потоков ЭП.

Выполнен анализ моделируемых приращений векторов потока ЭП и n_m^2 для СПВ во время и после ВСП относительно их состояния перед потеплением. Наиболее значительные приращения показателя преломления обнаружены на высотах 30–70 км и широтах 20–70° N. Они соответствуют изменениям среднезонального зонального ветра на рис. 1а.

Для СПВ1 во время ВСП на широтах выше 50° N, векторы приращений потоков ЭП имеют те же направления, что и потоки ЭП перед ВСП на высотах 30–50 км, и имеют противоположное направление на высотах 30–90 км. Увеличение и уменьшение потоков ЭП соответствует увеличению и уменьшению амплитуд СПВ1 на среднем рис. 2а. Противоположное направление векторов ЭП после потепления соответствует уменьшению амплитуды СПВ1 на правом рис. 2а. Аналогичная зависимость существует и для СПВ с $m > 1$. Направление векторов приращений потоков ЭП СПВ2 во время и после ВСП в основном противоположно направлениям этих потоков перед потеплением и соответствует уменьшениям амплитуд СПВ2 на среднем и правом рис. 2б на высоких широтах Северного полушария. Амплитуды СПВ3 и СПВ4 в Северном полушарии больше на среднем и меньше на правом рис. 2в и 2д, чем амплитуды на левых рисунках.

Распространяющиеся на запад НАМ могут иметь регионы с $n_m^2 > 0$ в областях восточных ветров Южного (летнего) полушария. Анализ векторов потока ЭП показывает, что распространяющиеся на запад НАМ в основном зарождаются в средних широтах Северного полушария, откуда они распространяются в регионы Южного полушария по волноводам с $n_m^2 > 0$. Таким образом, амплитуды НАМ могут иметь значительные амплитуды в обоих полушариях. Наибольшие амплитуды в Южном полушарии на левых рис. 3 имеют НАМ с периодами 4 и 5 сут с наибольшими горизонтальными фазовыми скоростями $c = -61$ м/с и $c = -95$ м/с на экваторе соответственно. Таким образом, распространяющиеся на запад НАМ могут участвовать в динамических связях между обоими полушариями средней атмосферы. Перед ВСП вертикальные компоненты потока ЭП, как правило, направлены вверх в средней атмосфере средних и высоких северных широт. Согласно теории, это соответствует потокам тепла, создаваемым СПВ и НАМ, направленным на север, и вероятному нагреванию средней атмосферы вблизи Северного полюса, которое может способствовать развитию ВСП в зимний сезон.

Векторы приращений потоков ЭП во время и после ВСП могут иметь направление как совпадающее, так и противоположное направлению соответствующих потоков перед потеплением. Таким образом, изменения амплитуд распространяющихся на запад НАМ на рис. 3 положительны или отрицательны в зависимости от увеличения или уменьшения n_m^2 и величин потоков ЭП. Таким образом, изменения в условиях распространения НАМ могут влиять на температурный режим в средней арктической атмосфере.

Интересной особенностью правого рис. 3, является увеличение амплитуд НАМ в Южном полушарии после ВСП. Анализ обнаруживает значительные изменения значений n_m^2 в регионах с максимальной амплитудой распространяющихся на запад НАМ в Южном полушарии. Эти изменения могут быть

связаны как с ВСП, так и с сезонными трансформациями среднезональных полей ветра и температуры в южном полушарии. Таким образом, изменения амплитуд СПВ и НАМ на рис. 2–3 могут быть связаны с изменениями показателя преломления атмосферы для ПВ из-за изменений фоновых температуры и ветра, а также с изменениями потоков ЭП перед, во время и после ВСП.

3.4. Влияние стационарных орографических гравитационных волн

Описанные выше эксперименты с моделью МСВА были проведены с использованием параметризации динамических и тепловых эффектов ОГВ (см. п. 2). Согласно таблице включение параметризации ОГВ

приводит к более раннему (примерно на 20 сут) развитию ВСП. Для того чтобы сравнить результаты экспериментов с параметризацией и без параметризации ОГВ, рассчитываются приращения амплитуд ПВ при включении параметризации ОГВ, осредненные по временным интервалам перед, во время и после ВСП (табл.). Положительные или отрицательные приращения соответствуют увеличению или уменьшению амплитуд ПВ при включении параметризации ОГВ.

На рис. 4 показаны приращения амплитуд вариаций геопотенциальной высоты для СПВ1 – СПВ4. На левых и средних рис. 4 видно общее увеличение (до 70%) амплитуд большинства СПВ в средних и высоких широтах Северного полушария до

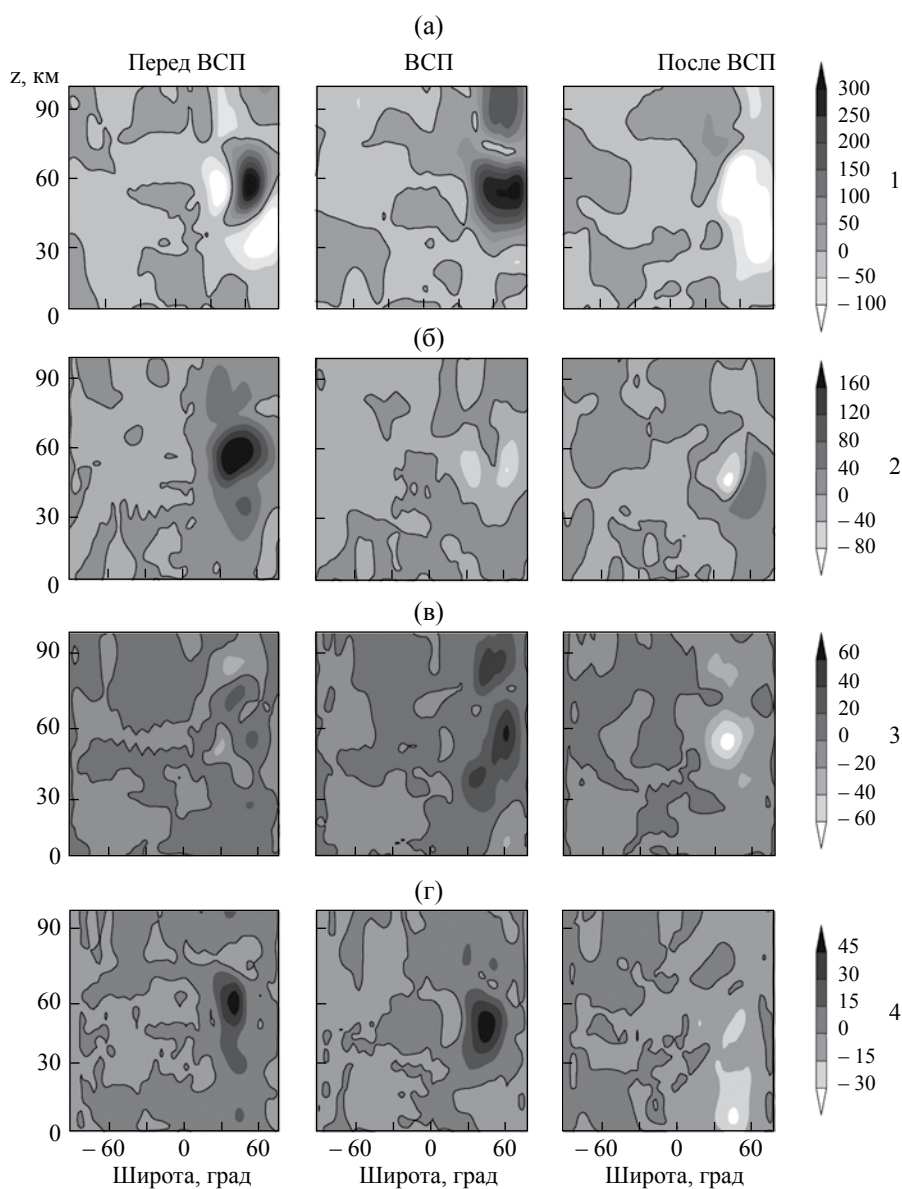


Рис. 4. Разности амплитуд СПВ с $m = 1, 2, 3, 4$ (а, б, в, г) в полях геопотенциала, вызванных динамическим и тепловым воздействием ОГВ перед (слева) во время (в середине) и после (справа) ВСП (см. табл.). Толстые линии соответствуют нулевым значениям.

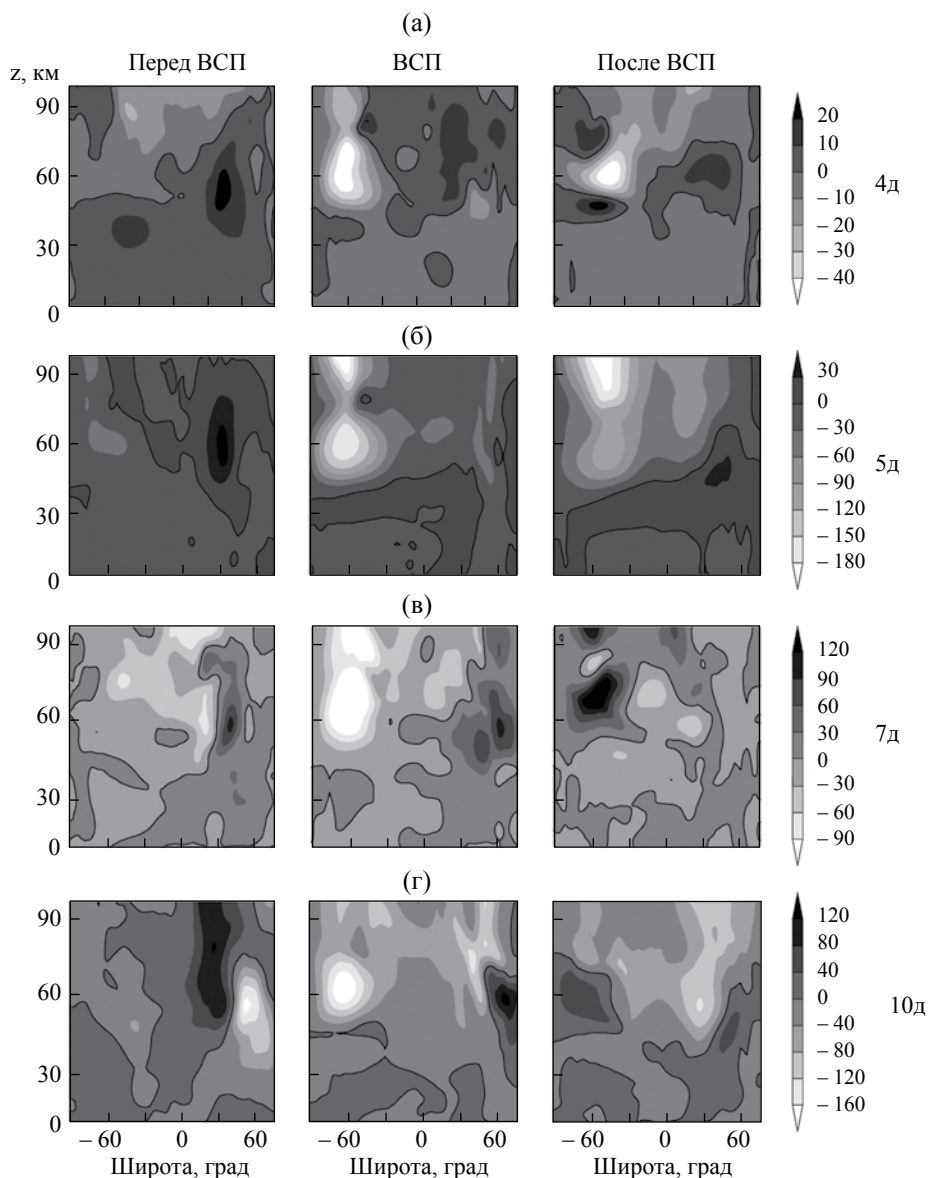


Рис. 5. То же, что на рис.4, но для распространяющихся на запад НАМ с $\tau = 4$ сут, $m = 2$ (а); $\tau = 5$ сут, $m = 1$ (б); $\tau = 7$ сут, $m = 2$ (в); $\tau = 10$ сут, $m = 1$ (г).

и во время ВСП. Приращения амплитуд СПВ3 на левом рис. 4 менее значительны. Для СПВ1 перед ВСП на высотах ниже 50 км и для СПВ2 во время ВСП на высотах 30–60 км при включении параметризации ОГВ амплитуды уменьшаются вплоть до 50%, как показано на рис. 4. После ВСП на средних и высоких широтах Северного полушария на правых рис. 4 преобладают отрицательные приращения амплитуд СПВ (уменьшение до 50%) при включении параметризации ОГВ. Правый рис. 4б показывает положительное приращение амплитуды СПВ2 после ВСП на высоте ниже 60 км. Особенности горизонтального распределения генерации ОГВ, описанные в п. 3.1 могут менять распределения волновых ускорений в средней атмосфере

и по-разному влиять на амплитуды СПВ в разные временные фазы ВСП.

Для проверки статистической достоверности ненулевых значений приращений амплитуд СПВ на рис. 4 применен парный статистический *t*-тест Стьюдента [44]. Приращения на рис. 4 для каждого диапазона высоты, широты и каждого 11-дневного интервала, перечисленных в таблице, получены осреднением разностей 4224 пар амплитуд СПВ в 64 узлах долготной сетки и 66 значений времени (4-часовой вывод результатов). Парный *t*-тест Стьюдента показал статистическую достоверность ненулевых приращений амплитуд СПВ выше 95%, если их абсолютные значения на рис. 4 превышают 6–9 г.п.м.

Для лучшего понимания механизма влияния ОГВ мы рассчитали разности потоков ЭП и показателей преломления атмосферы для ПВ (см. п. 3.3). Анализ показал, что в соответствии с теорией ПВ положительные приращения амплитуд СПВ на рис. 4 соответствует уменьшениям n_m^2 и увеличению модулей векторов потока ЭП для соответствующих мод СПВ.

На рис. 5 приведены приращения амплитуд распространяющихся на запад НАМ, вызванные учетом параметризации ОГВ в модели МСВА. На левом рис. 5а воздействие ОГВ увеличивает амплитуду 4-суточной НАМ перед ВСП на высотах 30–70 км и широтах 30–60° N. Это соответствует значительному увеличению направленных на юг потоков ЭП и их проникновению в волноводы для распространяющихся на запад НАМ, существующие в Южном полушарии (см. п. 2.3). Дивергенция этих потоков, сформировавшихся до ВСП, приводит к отрицательным приращениям амплитуды 4-суточной НАМ на высотах выше 50 км на средних и высоких широтах Южного полушария на среднем рис. 5а во время потепления. Это уменьшение амплитуды НАМ соответствует значительным изменениям n_m^2 и изменениям направления потоков ЭП, которые разворачиваются в Северном направлении и могут оказывать дополнительное динамическое влияние на амплитуды НАМ в Северном полушарии на правом рис. 5а после ВСП. Для других распространяющихся на запад НАМ на рис. 5 модель поведения потоков ЭП и n_m^2 аналогична описанной, с некоторыми особенностями для каждой конкретной моды. Таким образом, трансэкваториальные потоки ЭП могут играть важную роль в динамических взаимодействиях на различных стадиях ВСП. В этом исследовании использован только один набор средних климатологических данных, соответствующий типичному событию главного ВСП. Воздействие ОГВ может как увеличить, так и уменьшить амплитуды различных мод СПВ и НАМ по-разному в каждом индивидуальном случае ВСП. Поэтому простое усреднение по ансамблю ВСП может приводить к компенсации этих изменений и ложному занижению эффектов ОГВ, которые могут быть значительными в каждом конкретном случае. Таким образом, важно изучить особенности эффектов ОГВ для каждого случая ВСП, прежде чем проводить их статистический анализ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Модель общей циркуляции атмосферы МСВА с включением параметризаций НАМ и ОГВ использована для численных экспериментов с использованием характерных для января–февраля усредненных данных метеорологического

реанализа UK Met Office за годы с восточной фазой КДК с 1992–2011 гг. Проанализированы изменения амплитуд стационарных ПВ и распространяющихся на запад НАМ для временных интервалов перед, во время и после “климатически среднего” явления ВСП с включением и без включения параметризации динамических и тепловых эффектов ОГВ.

Эксперименты показали, что во время ВСП на высоких широтах Северного полушария увеличиваются амплитуды СПВ с зональным волновым числом $m = 1, 3, 4$ и уменьшаются амплитуды с $m = 2$. После ВСП амплитуды всех мод СПВ уменьшаются на 50–70% по сравнению с соответствующими амплитудами перед ВСП. Амплитуды распространяющихся на запад НАМ имеют максимумы не только в Северном, но и в Южном полушарии в связи с существованием волноводов для их распространения. На средних и высоких широтах Северного полушария во время ВСП амплитуды 4- и 5-суточных НАМ уменьшаются, а амплитуды 7- и 10-суточных НАМ увеличиваются по сравнению с соответствующими амплитудами перед и после ВСП (см. рис 3). На высотах более 40 км в Южном полушарии после ВСП амплитуды распространяющихся на запад НАМ возрастают. Рассчитанные колебания амплитуд СПВ и НАМ соответствуют изменениям средней температуры, ветра, потока ЭП и показателя преломления атмосферы для ПВ во время временных интервалов перед, во время и после ВСП.

Включение параметризации динамических и тепловых эффектов ОГВ в модель МСВА приводит к увеличению амплитуд (на 30–70%) практически всех мод СПВ перед и во время ВСП, и их уменьшению (на 20–100%) после завершения ВСП на средних и высоких широтах Северного полушария (см. рис. 4). Увеличения амплитуд СПВ соответствуют уменьшению n_m^2 и росту модулей соответствующих потоков ЭП при воздействии ОГВ. Амплитуды НАМ на высотах выше 40 км под воздействием ОГВ возрастают (на 50–80%) перед ВСП на средних и высоких северных широтах, уменьшаются на средних широтах Северного и Южного полушария во время ВСП, и характеризуются разнонаправленными приращениями после ВСП. Амплитуды распространяющихся на запад НАМ в Южном полушарии уменьшаются во время ВСП, что может быть вызвано дивергенцией направленных на юг потоков ЭП, усиливающихся под воздействием ОГВ перед ВСП и распространяющихся в Южное полушарие.

Данное исследование характеристик СПВ и НАМ, и их изменений за счет учета ОГВ во время внезапного стратосферного потепления проводилось только для климатологических условий, характерных для восточной фазы КДК.

Ранее авторами проводилось изучение влияния изменения фазы КДК и воздействия ОГВ на планетарные волны в средней атмосфере, без учета ВСП [41]. Было показано, что изменение фазы КДК может способствовать изменению амплитуды СПВ до $\pm 30\text{--}90\%$ в средних и высоких широтах средней атмосферы. Изменения амплитуд распространяющихся на запад НАМ могут варьироваться (до $50\text{--}90\%$) на различных высотах и широтах Северного полушария за счет эффектов ОГВ. Эти изменения согласуются с распределениями потока ЭП и показателя преломления в различных фазах КДК. Для изучения влияния ОГВ на планетарные волны при западной фазе КДК во время ВСП требуется проведение дополнительных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-35-60013 мол_а_дк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McInturff R.M.* Stratospheric warmings: Synoptic, dynamic, and general circulation aspects. NASA Ref. Publ. 1017. 1978. 166 p.
2. *McIntyre M.E.* How well do we understand the dynamics of stratospheric warmings // *J. Meteorol. Soc. Japan.* 1982. V. 60. P. 37–64.
3. *Quiroz R.* Stratospheric evolution of Sudden warmings in 1969–74 determined from measured infrared radiation fields // *J. Atmos. Sci.* 1975. V. 32. P. 211–224. doi:10.1175/1520-0469(1975)032<0211:TSEOSW>2.0.CO;2. 1975.
4. *Labitzke K.* Interannual variability of the winter stratosphere in the northern hemisphere // *Mon. Weather Rev.* 1977. V. 105. P. 762–770, doi:10.1175/1520-0493(1977)105<0762:IVOTWS>2.0.CO;2.
5. *Schoeberl M.* Stratospheric warmings – observations and theory // *Rev. Geophys.* 1978. V. 16. P. 521–538, doi:10.1029/RG016i004p00521
6. *Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J.* The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. № 2. P. 179–229.
7. *Baldwin M.P., Dameris M., Shepherd T.G.* How will the stratosphere affect climate change? // *Science.* 2007. V. 316. P. 1576–1577.
8. *Sun L., Robinson W.A.* Downward influence of stratospheric final warming events in an idealized model // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L03819, doi: 1029/2008gl036624.
9. *Siskind D.E., Eckermann S.D., McCormack J.P., Coy L., Hoppel K.W., Baker N.L.* Case studies of the mesospheric response to recent minor, major and extended stratospheric warmings // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D00N03, doi: 10.1029/2010JD014114.
10. *Kurihara J., Ogawa Y., Oyama S., Nozawa S., Tsutsumi M., Hall C.M., Tomikawa Y., Fujii R.* Links between a stratospheric sudden warming and thermal structures and dynamics in the high-latitude mesosphere, lower thermosphere, and ionosphere // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L13806, doi: 10.1029/2010GL043643. 2010.
11. *Liu H., Doornbos E., Yamamoto M., Ram S.T.* Strong thermospheric cooling during the 2009 major stratosphere warming // *Geophys. Res. Lett.* 2011. 38. L12102, doi:10.1029/2011GL047898.
12. *Yuan T., Thurairajah B., She C-Y., Chandran A., Collins R.L., Krueger D.A.* Wind and temperature response of midlatitude mesopause region to the 2009 sudden stratospheric warming // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117: D09114, doi: 10.1029/2011JD017142.
13. *Sun L., Robinson W.A., Chen G.* The predictability of stratospheric warming events: more from the troposphere or the stratosphere? // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 69. № 2. P. 768–783. doi: 10.1175/JAS-d-11-0144.1.
14. *Albers J.R., Birner T.* Vortex preconditioning due to planetary and gravity waves prior to sudden stratospheric warmings // *J. Atmos. Sci.* 2014. V. 71. P. 4028–4054, doi: 10.1175/JAS-d-14-0026.1.
15. *Andrews D.G., Holton J.R., Leovy C.B.* Middle Atmosphere Dynamics. New York: Academic press, 1987. 489 p.
16. *Buhler O.* Waves and Mean Flows. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 341 p.
17. *Holton J.R.* The dynamic meteorology of the stratosphere and mesosphere // *Meteorol. Monogr.* 1975. V. 15(37). P. 1–218.
18. *McLandress C., Shepherd T.G., Polavarapu S., Beagly S.* Is missing orographic gravity wave drag near 60S is the cause of the stratospheric zonal wind biases in chemistry–climate models? // *J. Atmos. Sci.* 2012. V. 69. P. 802–818.
19. *Gossard E.E., Hooke W.H.* Waves in the atmosphere. Amsterdam–Oxford–New York: Elsevier Sci. Publ. Co., 1975. 456 p.
20. *McLandress C.* The seasonal variation of the propagating diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere. Pt I: The role of gravity waves and planetary waves // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59. P. 893–906.
21. *Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Якоби К.* Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2005. Т. 41. № 1. С. 9–18.
22. *Ortland D.A., Alexander M.J.* Gravity wave influence on the global structure of the diurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere // *J. Geophys. Res.*, 2006. V. 111: A10S10, doi:10.1029/2005JA011467.
23. *Watanabe S., Miyahara S.* Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide

- in a gravity wave—resolving general circulation model // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D07110, doi:10.1029/2008JD011218.
24. *Holton J.R.* The generation of mesospheric planetary waves by zonally asymmetric gravity wave breaking // *J. Atmos. Sci.* 1984. V. 41. № 23. P. 3427–3430.
 25. *Mayr H.G., Mengel J.G., Chan K.L., Huang F.T.* Middle atmosphere dynamics with gravity wave interactions in the numerical spectral model: Tides and planetary waves // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. P. 711–730.
 26. *Hoffmann P., Jacobi Ch., Borries C.* A possible planetary wave coupling between the stratosphere and ionosphere by gravity wave modulation // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. V. 75–76. P. 71–80. doi:10.1016/j.jastp.2011.07.008.
 27. *Гаврилов Н.М., Коваль А.В., Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н.* Численное моделирование реакции общей циркуляции средней атмосферы на пространственные неоднородности орографических волн // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49. № 4. С. 401–408.
 28. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* Numerical modeling influence of inhomogeneous orographic waves on planetary waves in the middle atmosphere // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51. № 11. P. 2145–2154.
 29. *Pogoreltsev A.I., Vlasov A.A., Froehlich K., Jacobi Ch.* Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2007. V. 69. P. 2083–2101, doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014.
 30. *Inoue M., Takahashi M., Naoe H.* Relationship between the stratospheric quasi-biennial oscillation and tropospheric circulation in northern autumn // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. D24115, doi:10.1029/2011jd016040.
 31. *Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н.* Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // *Геоматизм и аэрономия.* 2014. Т. 52. № 2. С. 357–372.
 32. *Pogoreltsev A.I.* Simulation of planetary waves and their influence on the zonally averaged circulation in the middle atmosphere // *Earth Planets Space.* 1999. V. 51. № 7/8. P. 773–784.
 33. *Longuet-Higgins M.S.* The eigenfunctions of Laplace's tidal equation over a sphere // *Philos. T.R. Soc. Lond.* 1968. V. 262. P. 511–607.
 34. *Pogoreltsev A.I., Kanukhina A. Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N.* Variability of Planetary Waves as a Signature of Possible Climatic Changes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 1529–1539, doi:10.1016/j.jastp.2009.05.011.
 35. *Гаврилов Н.М., Коваль А.В.* Параметризация воздействия мезомасштабных стационарных орографических волн для использования в численных моделях динамики атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2013. Т. 49. № 3. С. 243–251.
 36. *Scinocca J.F., McFarlane N.A.* The parameterization of drag induced by stratified flow over anisotropic orography // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2000. V. 126(568). P. 2353–2393.
 37. *Jacobi Ch., Fröhlich K., Portnyagin Y.* Semi-empirical model of middle atmosphere wind from the ground to the lower thermosphere // *Adv. Space. Res.* 2009. V. 43. P. 239–246.
 38. *Fedulina I.N., Pogoreltsev A.I., Vaughan G.* Seasonal, interannual and short-term variability of planetary waves in UKMO assimilated fields // *Q.J. Roy. Meteorol. Soc.* 2004. V. 130(602). P. 2445–2458.
 39. *Dickinson R.E.* Planetary Rossby waves propagating vertically through weak westerly wave guides // *J. Atmos. Sci.* 1968. V. 25. P. 984–1002.
 40. *Matsuno T.* Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere // *J. Atmos. Sci.* 1970. V. 27. P. 871–883.
 41. *Gavrilov N.M., Koval A.V., Pogoreltsev A.I., Savenkova E.N.* Simulating influences of QBO phases and orographic gravity wave forcing on planetary waves in the middle atmosphere // *Earth, Planets and Space.* 2015. V. 67. № 86, doi 10.1186/s40623-015-0259-2, 2015.
 42. *Karoly D.J., Hoskins B.J.* Three dimensional propagation of planetary waves // *J. Meteor. Soc. Japan.* 1982. V. 60. P. 109–123.
 43. *Albers J.R., McCormack J.P., Nathan T.R.* Stratospheric ozone and the morphology of the northern hemisphere planetary waveguide // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2013. V. 118. P. 563–576, doi:10.1029/2012jd017937.
 44. *Rice J.A.* Mathematical statistics and data analysis. Pacific Grove: Duxbury Press, 2006. 603 p.

Numerical Simulation of Wave Interactions During Sudden Stratospheric Warming in the Middle Atmosphere

N. M. Gavrilov^{1,*}, A. V. Koval^{1,**}, A. I. Pogoreltsev², E. N. Savenkova¹

¹*Atmospheric Physics Department, Saint-Petersburg State University
199034 Russia, St. Petersburg, Universitetskaya Embarkment 7–9*

²*Meteorological Forecast Department, Russian State Hydrometeorological University
Russia, 195196, St. Petersburg, Malookhtinsky pr., 98*

**E-mail: n.gavrilov@spbu.ru,*

***E-mail: koval_spbu@mail.ru*

Parameterizations of normal atmospheric modes (NAMs) and orographic gravity waves (OGWs) were implemented into the mechanistic general circulation model of the middle and upper atmosphere (MUAM). Numerical experiments of sudden stratospheric warming events (SSW) were performed for the climatological conditions typical for January and February using meteorological reanalysis data from the UK MET Office in the MUAM, averaged over the years 1992–2011 with the easterly phase of quasi-biennial oscillation (QBO). The simulation shows that increasing the OGW amplitudes occurs at altitudes higher than 30 km in the Northern hemisphere after the SSW. The OGW amplitudes have maximums at altitudes of about 50 km over the North American and European mountain systems before and during the SSW, as well as over the Himalayas after the SSW. At the high latitudes of the Northern hemisphere significant (up to 50–70%) variations of the amplitudes of stationary planetary waves (SPW) during and after the SSW were observed. Westward travelling NAMs have local amplitude maximums not only in the Northern but also in the Southern hemisphere, where there are waveguides for propagation of these modes. Calculated increments of SPW and NAM amplitudes correspond to changes in the mean temperature and wind fields as well as Eliassen-Palm flux and atmospheric refractive index for the planetary waves during SSW. Including of the OGW thermal and dynamical effects leads to increase in amplitude (30–70%) of almost all SPW before and during the SSW and a decrease (up to 20–100%) after the SSW at middle and high latitudes of the Northern Hemisphere.

Keywords: atmospheric circulation; modeling; middle and upper atmosphere; planetary waves; orographic gravity waves; parameterization; sudden stratospheric warming