

УДК 551.513.11; 551.513.27

Численное моделирование влияния фаз КДК и ЭНЮК на распространение планетарных волн и формирование внезапного стратосферного потепления

В.Д. Лифарь^{✉1}, К.А. Диденко^{1,2}, А.В. Коваль^{1,3}, Т.С. Ермакова^{1,3*}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН
108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4

³ Российский государственный гидрометеорологический университет
192007, г. Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79

Поступила в редакцию 09.08.2023;
после доработки 25.09.2023;
принята к печати 26.09.2023

Изучено влияние квазидвухлетнего колебания (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере и Эль-Ниньо – Южного колебания (ЭНЮК) на динамическое состояние стратосферы в зимний период и формирование внезапного стратосферного потепления (ВСП). Проведены численные эксперименты с помощью нелинейной модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы для зимы Северного полушария (январь–февраль), позволившие оценить чувствительность полей зонального ветра, температуры и геопотенциала к учету в модели определенной фазы ЭНЮК и КДК. В зависимости от комбинации фаз статистика наблюдаемых ВСП и их эволюция различаются. Например, наибольшее количество ВСП наблюдается при комбинации Эль-Ниньо/восточная фаза КДК, а при комбинации Ла-Нинья/западная фаза КДК главные ВСП не воспроизводятся моделью. Для комбинаций Эль-Ниньо/восточная фаза КДК, Эль-Ниньо/западная фаза КДК и Ла-Нинья/восточная фаза КДК были усреднены поля гидродинамических параметров, чтобы исследовать характерные особенности модельных «климатических» ВСП. Результаты численного моделирования показывают, что наибольшие увеличения температуры в стратосфере и похолодания в мезосфере воспроизводятся при условиях Эль-Ниньо/восточная фаза КДК, а наибольшее ослабление ветра – при комбинации Эль-Ниньо/западная фаза КДК. Наибольшие амплитуды планетарных волн в ходе моделирования отмечаются при восточной фазе КДК вне зависимости от фазы ЭНЮК. Полученные результаты могут использоваться при составлении прогнозов климата от месяца до десятилетий.

Ключевые слова: численное моделирование, Эль-Ниньо – Южное колебание, квазидвухлетнее колебание, планетарные волны, внезапное стратосферное потепление; numerical simulation, El Niño – Southern Oscillation, quasi-biennial oscillation, planetary wave, sudden stratospheric warming.

Введение

Исследования в области атмосферной динамики последних лет показали, что ряд явлений оказывает значительное влияние на зимнюю стратосферу. К ним относятся Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), квазидвухлетнее колебание (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере и внезапные стратосферные потепления (ВСП). Известно, что ЭНЮК сильно влияет на зимнюю стратосферу через волновое взаимодействие с тропосферой, которое происходит из-за изменения распределения тепла и массы в тропосфере, воздействуя на генерацию и передачу волн в стратосферу [1].

Сильные фазы ЭНЮК могут влиять на зимнюю стратосферу через атмосферные волны, которые возникают на экваторе и распространяются вверх и к полюсу [2]. В результате наблюдается существенное изменение циркуляции зимней стратосферы, а также уменьшение общей температуры. Однако исследования также показали, что воздействие ЭНЮК на стратосферу является неустойчивым и может зависеть от времени года, фазы цикла КДК и других факторов [3]. Кроме того, в периоды сильных Ла-Нинья и восточной фазы КДК вероятность возникновения ВСП выше, чем в периоды других комбинаций исследуемых тропических колебаний. И наоборот, во время западной фазы КДК вероятность возникновения ВСП ниже [4, 5].

Взаимодействие между КДК и ЭНЮК может вызывать значительные изменения циркуляции зимней стратосферы, а также влиять на климатические условия в тропосфере Северного полушария [6].

* Виталия Дмитриевна Лифарь (vitaliyalif@gmail.com); Ксения Андреевна Диденко (didenko.Xeniya@yandex.ru); Андрей Владиславович Коваль (a.v.koval@spbu.ru); Татьяна Сергеевна Ермакова (taalika@mail.ru).

Например, если КДК входит в западную фазу во время сильной Эль-Ниньо, это может усилить воздействие ЭНЮК на стратосферу. Внезапные стратосферные потепления, в свою очередь, влияют на термодинамический режим всей средней атмосферы, а также на формирование погодных аномалий и изменение климата в тропосфере [7].

Основная цель работы — исследовать влияние различных фаз ЭНЮК и КДК на волновые процессы зимней стратосферы и формирование ВСП с помощью модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы (МСВА), позволяющей учитывать различные граничные, фоновые условия и источники планетарных волн.

Материалы и методы

Для изучения крупномасштабных динамических явлений в настоящей работе используется численное моделирование. Оно имеет ряд существенных преимуществ: в отличие от современных данных реанализа/ассимиляции метеорологической информации, доступных, как правило, до высот 50–70 км, модельные данные охватывают диапазон высот от поверхности до 300–400 км на регулярной сетке. Помимо этого, при моделировании мы проводим идеализированные эксперименты, фиксируя все внешние условия и изменяя только параметры изучаемых процессов (КДК и ЭНЮК). Такой анализ невозможно провести, используя данные наблюдений, так как на изучаемые процессы неизбежно накладываются другие атмосферные процессы и фазы естественных долгопериодных осцилляций, внося дополнительные источники случайности.

В исследовании применяется нелинейная механическая модель средней и верхней атмосферы [8], в последнее время активно развиваемая коллективом специалистов Санкт-Петербургского государственного университета и Российского государственного гидрометеорологического университета [9, 10]. Она позволяет воссоздать общую атмосферную циркуляцию от поверхности Земли до высоты 300–400 км. Модель основана на стандартной системе примитивных уравнений, адаптированных для сферической системы координат [11]. Для решения прогностических уравнений в МСВА используется процедура расщепления Марчука–Странга [12, 13], а для интегрирования по времени применяется схема Мацуно [14]. Горизонтальная сетка модели имеет шаги $5,625^\circ$ по долготе и 5° по широте. Вертикальная сетка модели использует лог-изобарическую координату $z = -H \ln(p/p_0)$, где p_0 — приземное давление, а $H = 7$ км — высота однородной атмосферы. В нашем исследовании используется версия модели с 56 уровнями по высоте. Шаг интегрирования по времени составляет 225 с. Основные параметры, рассчитываемые моделью, включают зональную, меридиональную и вертикальную компоненты скорости, геопотенциал и температуру. Более подробное описание учитываемых в актуальной версии модели процессов и численного эксперимента можно найти в [15].

Для учета стратосферного КДК в МСВА используется наджинг или, другими словами, метод релаксации смоделированных зонально усредненных полей зонального ветра к наблюдениям. Так как МСВА не способна самосогласованно воспроизводить КДК в стратосфере, то для моделирования требуется указание фоновых и начальных гидродинамических полей, соответствующих годам с различными фазами КДК [16]. Годы с восточной и западной фазами КДК были выбраны на основе метода разложения метеорологических полей на эмпирические ортогональные функции. Метод разложения, представленный в [17], заключается в том, что процесс эволюции КДК в поле зонального ветра, по данным японского 55-летнего реанализа JRA-55, разделяется на восемь фаз, и далее, для повышения статистической значимости, при выборе лет в качестве основных (западной и восточной) фаз КДК было предложено объединить 2-ю и 3-ю фазы в западную, а 6-ю и 7-ю фазы — в восточную [18]. Эта процедура позволила сформировать два набора, содержащих 10 лет с типичной западной (1983, 1985, 1993, 1995, 1997, 1999, 2002, 2004, 2008, 2013 гг.) и восточной фазами КДК (1987, 1989, 1996, 1998, 2000, 2003, 2005, 2007, 2010, 2012 гг.). По этим наборам были вычислены фоновые среднезональные распределения зонального ветра и температуры для двух фаз КДК, используемые в дальнейшем в МСВА.

Для учета фазы ЭНЮК используются данные о выделении скрытого тепла, усредненные за годы, соответствующие теплой фазе (относятся к Эль-Ниньо) и холодной фазе (Ла-Нинья). Годы с той или иной фазой ЭНЮК выбирались при помощи многомерного индекса MEI. Он основан на наборе из шести основных наблюдаемых переменных в тропической части Тихого океана: давление на уровне моря, зональная и меридиональная компоненты приземного ветра, температура поверхности моря, температура приземного воздуха и общая доля облачности. С помощью таблицы доступных значений MEI для условий Эль-Ниньо были отобраны 1983, 1992, 1998, 2003, 2010 гг., для условий Ла-Нинья — 1989, 1999, 2000, 2008, 2011 гг. [10].

При инициализации модели с учетом различных фаз ЭНЮК и КДК даже незначительные изменения в начальных условиях могут оказывать глобальное влияние на эволюцию моделируемой стратосферы. Малейшие отклонения в структуре и амплитуде планетарных волн в нелинейной модели вызывают изменения в среднем потоке, что приводит к изменению условий распространения этих волн, и с течением времени стратосферная динамика становится крайне неустойчивой и переменчивой. В связи с этим для достижения статистически значимых результатов в модельных расчетах требуются ансамблевые расчеты общей атмосферной циркуляции. В рамках МСВА ансамбли формируются путем выполнения множества итераций, расчетов («прогонов») модели, которые отражают различные фазы вассилляций среднего ветра и планетарных волн в средней атмосфере. Контроль за этими фазами в МСВА осуществляется

изменением даты включения суточных вариаций солнечного нагрева и генерации нормальных атмосферных мод. При этом начальные и фоновые условия во всех модельных расчетах берутся одинаковыми. Важно отметить, что среднемесячные амплитуды планетарных волн, интенсивность среднего потока и температура в стратосфере зимой могут значительно изменяться от одной итерации к другой. Эта изменчивость в расчетах модели трактуется как межгодовая вариация.

Результаты и обсуждение

С целью изучения влияния комбинаций фаз КДК и ЭНЮК на динамику зимней стратосферы была проведена серия модельных экспериментов для января–февраля. Получено четыре ансамбля решений по 10 реализаций в каждом, т.е. реализованы четыре сценария: Эль-Ниньо/восточная фаза КДК, Эль-Ниньо/западная фаза КДК, Ла-Нинья/восточная фаза КДК, Ла-Нинья/западная фаза КДК.

Распределения моделируемых гидродинамических полей

Для каждой модельной реализации («прогона») были получены и проанализированы поля зонального ветра, температуры и амплитуды планетарных волн с зональными волновыми числами $m = 1-3$ в поле геопотенциальной высоты для определения моделируемых внезапных стратосферных потеплений. При условиях Эль-Ниньо / восточная фаза КДК ВСП в январе–феврале наблюдалось в девяти реализациях из десяти. Главное (мажорное) потепление, сопровождающееся не только увеличением температуры в стратосфере, но и изменением направления зонального ветра, моделировалось в четырех случаях. При комбинации Эль-Ниньо/западная фаза КДК ВСП моделировалось

в восьми из десяти реализаций, мажорных было два. При холодной фазе ЭНЮК и восточной фазе КДК ВСП моделировалось в половине «прогонов» с одним мажорным потеплением. Результаты моделирования при комбинации Ла-Нинья/западная фаза КДК показали, что в этих условиях ВСП не воспроизводится в модели.

Моделируемое комозитное ВСП

Для исследования характерных особенностей ВСП и амплитуд планетарных волн, моделируемых при трех комбинациях КДК и ЭНЮК (кроме Ла-Нинья/западная фаза КДК), поля ветра, температуры и геопотенциала были усреднены по шести «прогонам» относительно даты начала роста температуры для трех 10-дневных интервалов: перед, во время и после ВСП. В таблице приведены выбранные «прогоны» в каждом из трех ансамблей и временные интервалы, соответствующие дням перед, во время и после ВСП. Кроме того, рассчитывались усредненные по двухмесячным интервалам (месяц до и после даты начала роста температуры) поля гидродинамических величин. После усреднения данных были получены распределения полей для модельного комозитного ВСП при трех комбинациях ЭНЮК и КДК.

На рис. 1 показаны высотно-временные распределения амплитуд планетарной волны с волновым числом 1 (ПВ1), зонального ветра и отклонений температуры от ее двухмесячных средних значений во время ВСП при условиях Эль-Ниньо/восточная фаза КДК. Также были построены высотно-временные распределения амплитуд планетарной волны с волновым числом 2 и 3 (ПВ2 и ПВ3) (здесь не представлены). Результаты для моделируемого комозитного ВСП при этой комбинации ЭНЮК и КДК показывают увеличение моделируемой температуры на 27 К в стратосфере на уровне 40 км,

Временные интервалы перед, во время и после ВСП, используемые для усреднения полей гидрометеорологических величин (в скобках указан номер реализации, выбранный в комбинации ЭНЮК и КДК)

Период	Эль-Ниньо/ восточная фаза КДК	Эль-Ниньо/ западная фаза КДК	Ла-Нинья/ восточная фаза КДК
Перед ВСП	25.12–03.01 (№ 1)	20–29.01 (№ 2)	17–26.01 (№ 1)
	03–12.01 (№ 3)	10–19.01 (№ 5)	25.12–03.01 (№ 4)
	01–10.01 (№ 6)	05–14.02 (№ 6)	12–21.01 (№ 5)
	01–10.01 (№ 7)	05–14.02 (№ 7)	27.01–05.02 (№ 5)
	18–27.01 (№ 8)	22–31.01 (№ 8)	26.01–04.02 (№ 6)
	16–25.12 (№ 9)	28.01–06.02 (№ 9)	31.01–09.02 (№ 9)
Во время ВСП	05–14.01 (№ 1)	31.01–09.02 (№ 2)	28.01–06.02 (№ 1)
	14–23.01 (№ 3)	21–30.01 (№ 5)	05–14.01 (№ 4)
	12–21.01 (№ 6)	16–25.02 (№ 6)	23.01–01.02 (№ 5)
	12–21.01 (№ 7)	16–25.02 (№ 7)	07–16.02 (№ 5)
	29.01–07.02 (№ 8)	02–11.02 (№ 8)	06–15.02 (№ 6)
	27.12–05.01 (№ 9)	08–17.02 (№ 9)	11–20.02 (№ 9)
После ВСП	16–25.01 (№ 1)	11–20.02 (№ 2)	08–17.02 (№ 1)
	25.01–03.02 (№ 3)	01–10.02 (№ 5)	16–25.01 (№ 4)
	23.01–01.02 (№ 6)	27.02–08.03 (№ 6)	03–12.02 (№ 5)
	23.01–01.02 (№ 7)	27.02–08.03 (№ 7)	18–27.02 (№ 5)
	09–18.02 (№ 8)	13–22.02 (№ 8)	17–26.02 (№ 6)
	07–16.01 (№ 9)	19–28.02 (№ 9)	22.02–03.03 (№ 9)

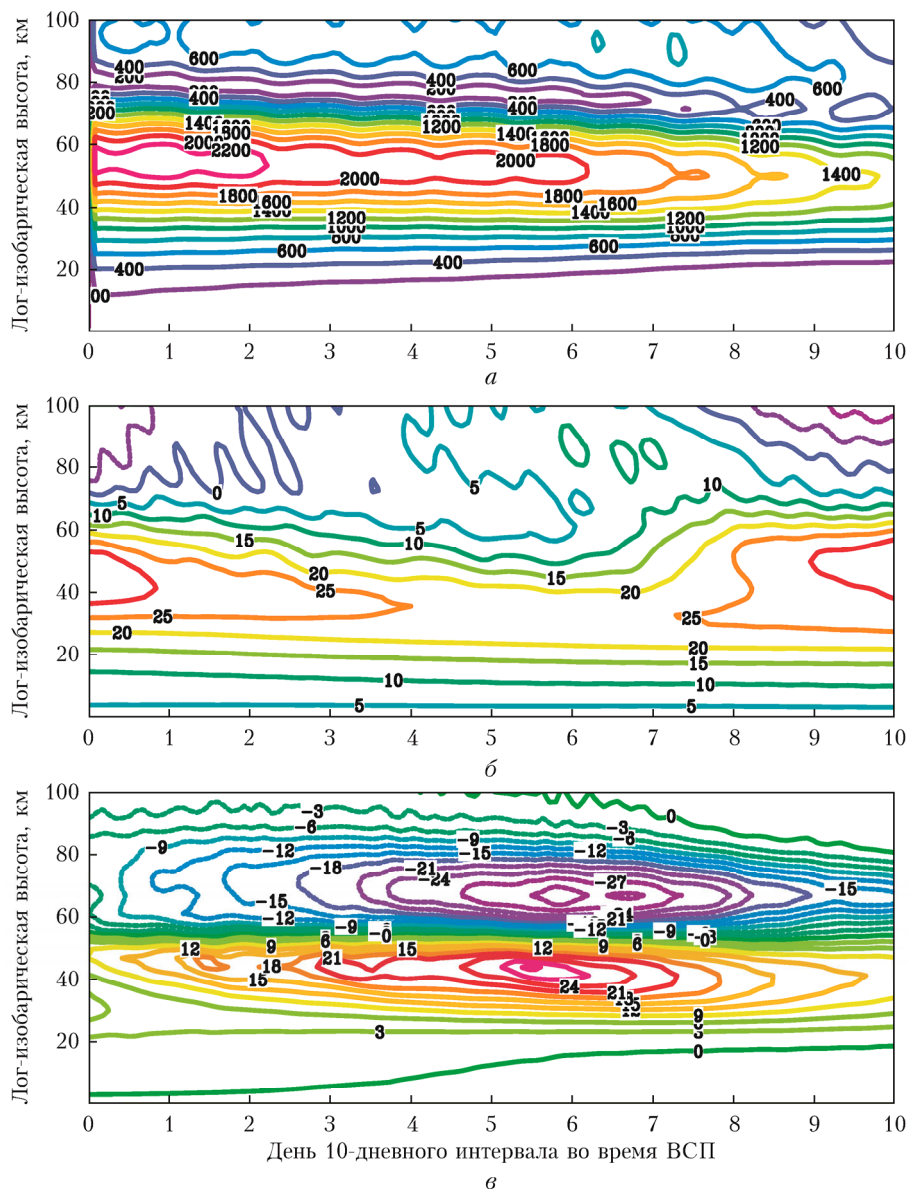


Рис. 1. Высотно-временное распределение амплитуд зональных гармоник в геопотенциальной высоте, м, с $m = 1$ (а) и среднего зонального ветра, м/с, на $62,5^\circ$ с.ш. (б); отклонения средней зональной температуры от усредненной за два месяца, К, на $87,5^\circ$ с.ш. (в) во время ВСП при комбинации Эль-Ниньо/восточная фаза КДК (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.02>)

что сопровождается мезосферным похолоданием на 30 К на уровне 70 км и соответствует наибольшим изменениям температуры из всех исследуемых комбинаций (рис. 1, в). Для представленного композитного ВСП (состоящего из мажорных и минорных отдельных ВСП) не моделируется смена направления среднезонального струйного течения (рис. 1, б). Скорость среднего зонального ветра на уровне 40 км ослабевает с 50 до 20 м/с и после ВСП восстанавливается практически до исходных значений. Наибольшее ослабление скорости зонального ветра наблюдается при Эль-Ниньо/западная фаза КДК (рис. 2, б). Амплитуды ПВ1 наивысшие в первые дни развития ВСП (~2200 м) в верхней стратосфере (рис. 1, а). Значительных

увеличений моделируемых амплитуд ПВ3 при этой комбинации нет. Амплитуды ПВ2 до потепления и в первые дни его развития составляют ~350 м на уровне 60 км, что наблюдается для трех исследуемых комбинаций. Максимальные амплитуды ПВ2 – ~400 м после ВСП на уровне 40 км; похожее распределение амплитуд воспроизводится численным моделированием также при условиях Ла-Нинья/восточная фаза КДК.

На рис. 2 показаны высотно-временные распределения при условиях Эль-Ниньо/западная фаза КДК. Для композитного модельного ВСП при такой комбинации характерны наименьшие по сравнению с другими комбинациями увеличения температуры в стратосфере (рис. 2, в) – всего на 15 К,

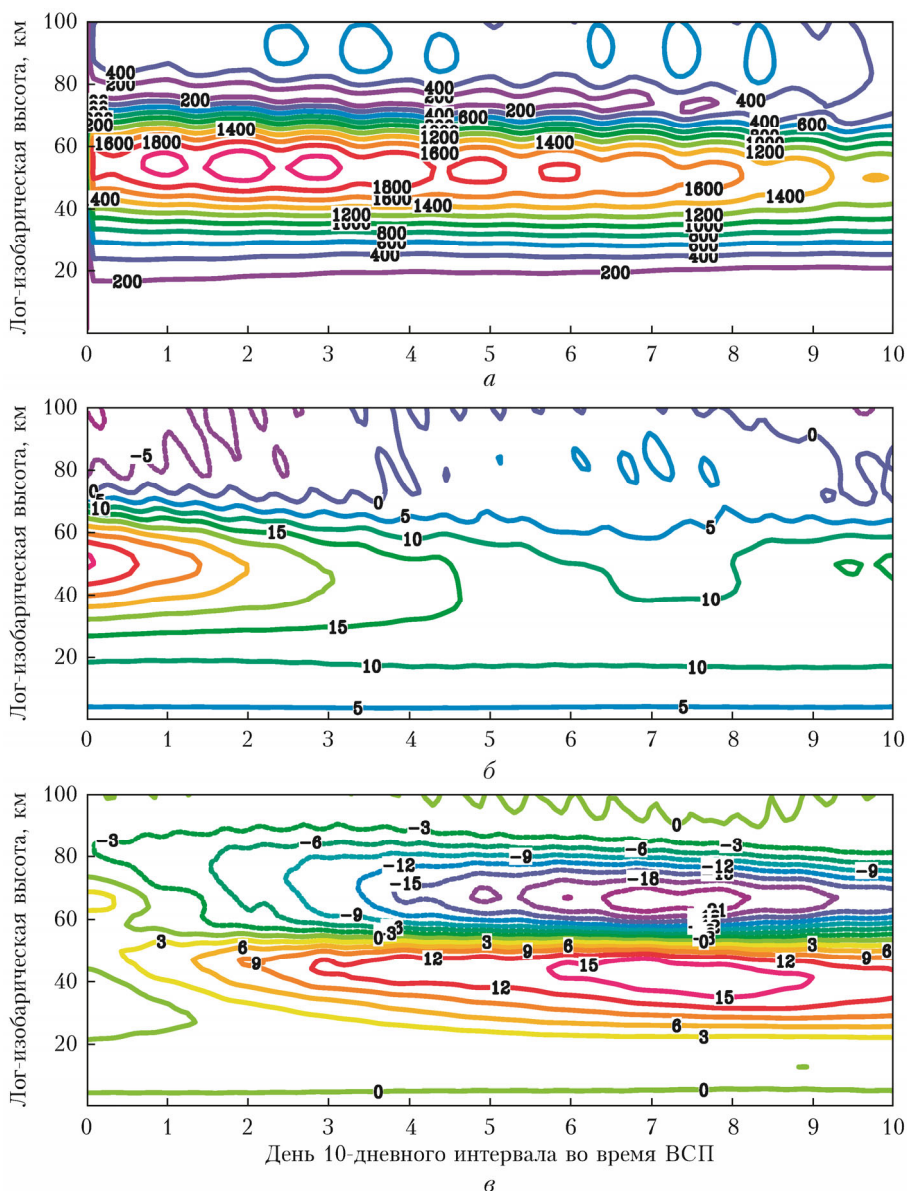


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но при комбинации Эль-Ниньо/западная фаза КДК (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.02>)

что сопровождается мезосферным похолоданием на 24 К. Изменения температуры здесь самые продолжительные среди всех трех комбинаций. При этом небольшие изменения температуры сопровождаются наибольшим ослаблением среднего зонального ветра (рис. 2, б): скорость уменьшается с 50 до 10 м/с и не восстанавливается до исходных значений в последние дни после потепления. Кроме этого, среди всех комбинаций в этом случае моделируются наименьшие амплитуды ПВ1 ~ 2000 м в процессе развития потепления (рис. 2, а). Наибольшие амплитуды ПВ2 ≈ 350 м и, в отличие от других комбинаций, имеют максимумы не только в верхней стратосфере, но и в средней. Значительные амплитуды ПВ3 на уровне 50 км моделируются во время развития ВСП.

Результаты высотно-временных распределений модельных гидродинамических полей для условий

Ла-Нинья/восточная фаза КДК показаны на рис. 3. Увеличение моделируемых отклонений температуры при такой комбинации чуть больше (до 21 К), чем для условий Эль-Ниньо/западная фаза КДК, но меньше, чем для условий Эль-Ниньо/восточная фаза КДК. Температура в мезосфере уменьшается на 24 К (рис. 3, в).

Изменение среднего зонального ветра при такой комбинации незначительное (на уровне 40 км ветер ослабевает на 10–15 м/с), а амплитуды ПВ1 значительные (~ 2200 м), как в случае комбинации Эль-Ниньо/восточная фаза КДК. Схожее распределение амплитуд моделируется для ПВ2, т.е. до потепления и в первые дни его развития на уровне 60 км ПВ2 имеют амплитуды ~ 350 м и максимальные амплитуды ~ 400 м после ВСП на уровне 40 км. В отличие от комбинации Эль-Ниньо/восточная фаза КДК, где амплитуды ПВ3 были незначительные,

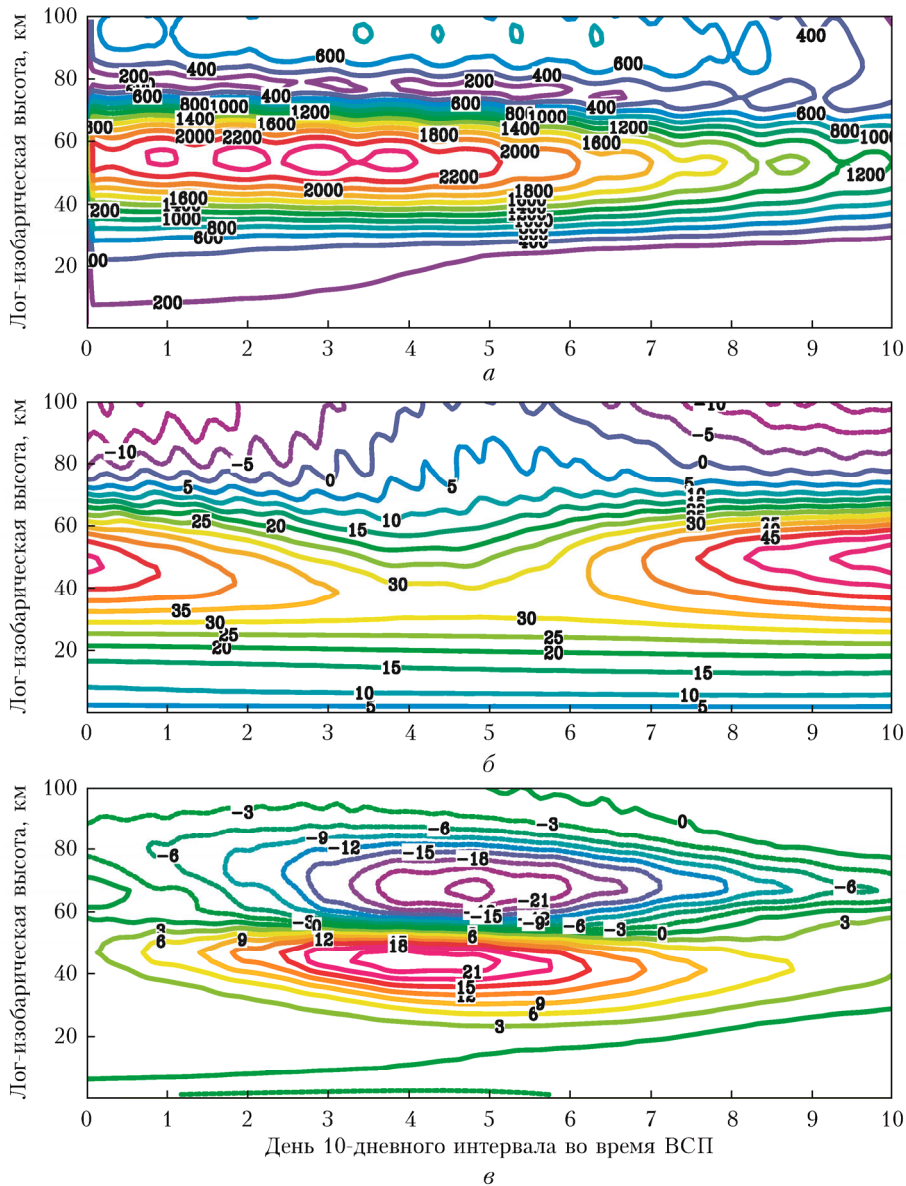


Рис. 3. То же, что на рис. 1, при комбинации Ла-Нинья/восточная фаза КДК (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.37-2024/iss.02>)

при комбинации Ла-Нинья/восточная фаза КДК моделируются амплитуды ПВЗ ~ 200 м на уровне 50 км во время развития ВСП.

Заключение

С использованием нелинейной механистической модели общей циркуляции средней и верхней атмосферы проведен ряд численных экспериментов с различными сценариями с целью исследовать влияние различных фаз ЭНЮК и КДК на волновые процессы зимней стратосферы и формирование внезапного стратосферного потепления. Результаты моделирования показали чувствительность динамики зимней стратосферы к учету фаз КДК и ЭНЮК. Чувствительность проявляется в изменении распределений температуры, амплитуд планетарных волн и среднего зонального потока, которые приводят

к формированию в модели ВСП. Моделирование при различных комбинациях фаз ЭНЮК и КДК показало, что при учете условий Ла-Нинья/западная фаза КДК ВСП в модели не воспроизводится.

Результаты усреднения метеорологических полей по шести «прогонам» относительно даты начала потепления для ансамблей с учетом условий Эль-Ниньо/восточная фаза КДК; Эль-Ниньо/западная фаза КДК и Ла-Нинья/восточная фаза КДК показали наличие обратной связи между КДК и ЭНЮК с изменениями температуры в стратосфере и мезосфере. Наибольшие увеличения температуры в стратосфере и похолодания в мезосфере моделируются в условиях Эль-Ниньо/восточная фаза КДК, наибольшие ослабления скорости среднего зонального ветра – при Эль-Ниньо/западная фаза КДК. Амплитуды ПВ1 и ПВ2 наибольшие при восточной фазе КДК вне зависимости от фазы ЭНЮК.

Таким образом, результаты исследования подтверждают важность учета КДК и ЭНЮК при анализе зимней стратосферы. Они играют существенную роль в формировании вертикальных и горизонтальных изменений в атмосфере, влияя на активность планетарных волн и среднего зонального потока. Подготовленная в рамках настоящей работы база данных полей гидродинамических параметров атмосферы для зимних месяцев Северного полушария по данным численного моделирования при учете различных комбинаций ЭНЮК и КДК позволит в дальнейшем проводить дополнительные исследования волновых и динамических процессов в средней атмосфере.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ (научный проект № 20-77-10006-П).

Список литературы

1. *Serva F., Cagnazzo C., Christiansen B., Yang Sh.* The influence of ENSO events on the stratospheric QBO in a multi-model ensemble // *Clim. Dyn.* 2020. V. 54. P. 2561–2575.
2. *Garfinkel C., Hartmann D.* Different ENSO teleconnections and their effects on the stratospheric polar vortex // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. P. D18114.
3. *García-Herrera R., Calvo N., García R.R., Giorgetta M.A.* Propagation of ENSO temperature signals into the middle atmosphere: A comparison of two general circulation models and ERA-40 reanalysis data // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. D06101.
4. *Garfinkel C.I., Hartmann D.L.* Effects of the El Niño – Southern Oscillation and the quasi-biennial oscillation on polar temperatures in the stratosphere // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. D19112.
5. *Baldwin M.P., Gray L.J., Dunkerton T.J., Hamilton K., Haynes P.H., Randel W.J., Holton J.R., Alexander M.J., Hirota I., Horinouchi T., Jones D.B.A., Kinniersley J.S., Marquardt C., Sato K., Takahashi M.* The quasi-biennial oscillation // *Rev. Geophys.* 2001. V. 39. P. 179–229.
6. *Holton J.R., Tan H.C.* The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb // *J. Atmos. Sci.* 1980. V. 37. P. 2200–2208.
7. *Salminen A., Asikainen T., Maliniemi V., Mursula K.* Dependence of sudden stratospheric warmings on internal and external drivers // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. P. 1–9.
8. *Погорельцев А.И.* Генерация нормальных атмосферных мод стратосферными васциляциями // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2007. Т. 43, № 4. С. 463–475.
9. *Коваль А.В.* Расчет остаточной меридиональной циркуляции по данным модели средней и верхней атмосферы // *Ученые записки РГГМУ.* 2019. Т. 55. С. 25–32.
10. *Ermakova T.S., Aniskina O.G., Statnaya I.A., Motsakov M.A., Pogoreltsev A.I.* Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // *Earth, Planets Space.* 2019. V. 71, N 8. P. 1–9.
11. *Гаврилов Н.М., Погорельцев А.И., Якоби К.* Численное моделирование влияния широтно-неоднородных гравитационных волн на циркуляцию средней атмосферы // *Изв. РАН. Физика атмосф. и океана.* 2005. Т. 41, № 1. С. 14–24.
12. *Marchuk G.I.* Numerical Methods in Weather Forecast. New York: Academic Press, 1967. P. 118–157.
13. *Strang G.* On the construction and comparison of difference schemes // *SIAM. J. Numer. Anal.* 1968. V. 5. P. 516–517.
14. *Matsuno T.* Numerical integration of the primitive equations by a simulated backward difference method // *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 1966. V. 44. P. 76–84.
15. *Koval A.V., Chen W., Didenko K.A., Ermakova T.S., Gavrilo N.M., Pogoreltsev A.I., Toptunova O.N., Wei K., Yarusova A.N., Zarubin A.S.* Modelling the residual mean meridional circulation at different stages of sudden stratospheric warming events // *Ann. Geophys.* 2021. V. 39. P. 357–368.
16. *Koval A.V., Gavrilo N.M., Kandieva K.K., Ermakova T.S., Didenko K.A.* Numerical simulation of stratospheric QBO impact on the planetary waves up to the thermosphere // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. P. 1–12.
17. *Ракушина Е.В., Кандиева К.К., Анискина О.Г., Погорельцев А.И.* Применение аппарата естественных ортогональных функций для анализа крупномасштабных динамических процессов в средней атмосфере // *Труды ГГО им. А.И. Воейкова.* 2018. Вып. 591. С. 105–123.
18. *Koval A.V., Gavrilo N.M., Pogoreltsev A.I., Kandieva K.K.* Dynamical impacts of stratospheric QBO on the global circulation up to the lower thermosphere // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2022. V. 127. P. 1–14.

V.D. Lifar, K.A. Didenko, A.V. Koval, T.S. Ermakova. Numerical simulation of QBO and ENSO phase effect on the propagation of planetary waves and the evolution of sudden stratospheric warming.

The purpose of the present investigation is to evaluate the effect of tropical oscillations on the polar stratosphere. The influence of the quasi-biennial oscillation (QBO) of the zonal wind in the equatorial stratosphere and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) on the dynamic state of the stratosphere in winter and the evolution of sudden stratospheric warming (SSW) is studied. A number of numerical experiments were carried out using the nonlinear general circulation model of the middle and upper atmosphere (MUAM) for the winter conditions of the Northern Hemisphere (January–February). They made it possible to estimate the sensitivity of the fields of zonal wind, temperature, and geopotential to taking into account certain ENSO and QBO phases in the model. Depending on the combination of phases, the statistics of observed SSWs and their evolution differ. For example, the largest number of SSWs is observed under the combination of El Niño and the easterly QBO phase, while major SSWs are not reproduced by the model under the combination of La Niña and the westerly QBO phase. For combinations of El Niño/easterly QBO, El Niño/westerly QBO, La Niña/easterly QBO, the fields of hydrodynamic parameters were averaged to investigate the characteristic features of the model “climatic” SSWs. It is shown that the largest temperature increase in the stratosphere and cooling in the mesosphere are modeled under El Niño conditions and the eastern phase of QBO, but the wind weakening is maximal during El Niño and the western phase of QBO. The largest amplitudes of planetary waves are modeled during the QBO eastern phase regardless of the ENSO phase. The results can be used in climate forecasting on time scales from one month to decades.