







ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ОСЦИЛЛЯЦИЙ НА АМПЛИТУДЫ АТМОСФЕРНЫХ ПРИЛИВОВ ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНОГО СТРАТОСФЕРНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

А. В. Коваль^{*,1,2} , П. Н. Варгин^{2,3} , Н. М. Гаврилов¹ , К. А. Диденко^{1,4} ,
Т. С. Ермакова^{1,2} , М. М. Ефимов¹ и А. В. Соколов¹ 

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³Центральная Аэрологическая обсерватория, Долгопрудный, Москва, Россия

⁴Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

* **Контакт:** Андрей Владиславович Коваль, a.v.koval@spbu.ru

С целью изучения эволюции атмосферных приливов были проведены модельные расчеты общей атмосферной циркуляции с помощью 3-мерной нелинейной механистической модели МСВА. В качестве естественных тропических осцилляций рассматриваются: квазидвухлетнее колебание экваториального зонального ветра (КДК) в стратосфере и Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК). Изменения амплитуд приливов анализируются на трех 10-дневных интервалах времени перед, во время и после внезапного стратосферного потепления (ВСП). Рассматриваются композитные ВСП, состоящие из 6 событий, найденных в ансамблях расчетов, для каждой комбинации фаз КДК/ЭНЮК. Исследуются мигрирующие и немигрирующие суточные и полусуточные приливы с зональными волновыми числами, 1 и 2. Численные эксперименты, в частности, показали, что структура приливов восприимчива к воздействию ВСП, при этом во время ВСП амплитуды приливов при разных комбинациях КДК – ЭНЮК меняются по-разному. Например, при Эль-Ниньо и восточной фазе КДК заметно ослабление суточного мигрирующего прилива во время ВСП, а при Ла-Нинья и восточной фазе КДК, наоборот, амплитуда суточного прилива усиливается во время события, а после ВСП – ослабляется. Анализ численных экспериментов подтверждает существующие представления о существенной изменчивости приливов во время ВСП и демонстрирует важнейший источник этой изменчивости, связанный с комбинациями динамического воздействия КДК – ЭНЮК.

Ключевые слова: динамика атмосферы, атмосферные приливы, тропические осцилляции, внезапное стратосферное потепление.

Цитирование: Коваль, А. В., П. Н. Варгин, Н. М. Гаврилов, К. А. Диденко, Т. С. Ермакова, М. М. Ефимов, А. В. Соколов Численное моделирование воздействия естественных тропических осцилляций на амплитуды атмосферных приливов во время внезапного стратосферного потепления // Russian Journal of Earth Sciences. — 2025. — Т. 25. — ES1007. — DOI: 10.2205/2025es000939 — EDN: SXAGIY

<https://elibrary.ru/sxagi>

Получено: 1 июля 2024 г.

Принято: 8 октября 2024 г.

Опубликовано: 28 февраля 2025 г.



© 2025. Коллектив авторов.

Введение

Глобальные атмосферные волны, включая солнечные термические приливы, оказывают существенное влияние на динамику атмосферы, при этом на высотах мезосферы и нижней термосферы (МНТ) приливы играют основную роль в формировании термодинамического режима атмосферы [Forbes, 1982; Hagan et al., 1995; Jacobi et al., 1999; Manson et al., 1989; Pancheva et al., 2002; Smith, 2012]. Солнечные приливы – это колебания глобального масштаба с периодами солнечных суток (24 ч) и его гармоник

(12, 8 и 6 ч), которые в основном возникают в результате поглощения солнечной радиации водяным паром в тропосфере и озоном в стратосфере [Xu et al., 2012]. Из-за уменьшения плотности атмосферы и сохранения вертикального потока волновой энергии, амплитуды приливов увеличиваются с высотой и достигают максимума в МНТ области. Помимо собственно обмена импульсом со средним течением, приливы играют важную роль в нелинейных взаимодействиях планетарных волн (ПВ), модулируя их сигнал в МНТ области и, таким образом, способствуя распространению ПВ в верхнюю термосферу [Laštovička, 2006].

Долгопериодные атмосферные колебания, такие как Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК), квазивухлетнее колебание (КДК) стратосферного экваториального зонального ветра, а также цикличность солнечной активности влияют на региональную и глобальную циркуляцию, включая условия для генерации и распространения атмосферных волн различного масштаба [Baldwin et al., 2001; Gan et al., 2017; Hitchman et al., 2021; Koval et al., 2019, 2022b]. В частности, такие естественные тропические осцилляции, как КДК и ЭНЮК, оказывают существенное влияние и на стратосферный полярный вихрь посредством дальних связей [Garfinkel and Hartmann, 2007].

ЭНЮК генерируется в результате взаимодействия океана с атмосферой в тропической области Тихого океана. Положительные температурные аномалии в восточной или центральной экваториальной части Тихого океана, характерные для явления Эль-Ниньо (положительная фаза ЭНЮК), уменьшают обычно большую разницу температур поверхности моря. Как следствие, пассаты ослабевают, индекс Южного колебания становится аномально отрицательным, а уровень моря падает на западе и поднимается на востоке по мере развития потепления [Trenberth, 1997]. Изменения внетропической циркуляции во время Эль-Ниньо различных типов обсуждаются в работе [Ermakova et al., 2022]. Ла-Нинья представляет собой противоположную (отрицательную) фазу Южного колебания, при этом наблюдается низкое давление к западу от линии перемены дат, а высокое давление – к востоку в периоды аномально низких экваториальных температур поверхности Тихого океана. Огромное внимание уделяется изучению особенностей влияния ЭНЮК на глобальную атмосферную динамику высоких широт [Варгин и др., 2021; Коленникова и др., 2021; Ermakova et al., 2024; Wang et al., 2016].

КДК проявляется в тропической стратосфере как изменение направления зонального ветра со средним периодом порядка 2 лет, что также оказывает существенное влияние на глобальную циркуляцию атмосферы. КДК характеризуется попеременным западным и восточным режимами ветра, граница между которыми постепенно опускается. Как показали Холтон и Тан [Holton and Tan, 1980], КДК влияет на ширину и расположение внетропических волноводов, по которым ПВ распространяются из тропосферы в верхние слои атмосферы. Считается, что во время бореальной зимы полярный вихрь во время восточной фазы КДК (вКДК) слабее и более возмущен, чем во время западной фазы (зКДК) из-за повышенной волновой активности ПВ. Это подтверждают и результаты численного моделирования [Koval et al., 2022b]. Распространяясь разными путями по модифицированным волноводам, ПВ распространяют возмущения из КДК в высокие широты и верхние слои атмосферы, включая термосферу [Koval et al., 2022a].

В настоящее время все большее количество работ посвящено изучению особенностей совместного влияния КДК и ЭНЮК на циркуляцию стратосферы и тропосферы. Например, в [Kumar et al., 2022] авторы рассмотрели совместное влияние стратосферного КДК и ЭНЮК на полярный вихрь, субтропические западные струйные течения и волновые структуры. Было выявлено усиление стратосферного полярного вихря во время зКДК. Также авторы указали на то, что проявление КДК в стратосфере сильнее в условиях Ла-Нинья. Ma et al., 2022 также изучили совместное влияние КДК и ЭНЮК на взаимосвязь между протяженностью морского льда и евразийским климатом зимой через планетарную волновую активность и стратосферный полярный вихрь.

Формирование и развитие внезапных стратосферных потеплений (ВСП), в свою очередь, влияет на термодинамический режим всей средней атмосферы, а также на

формирование погодных аномалий и изменение климата в тропосфере [Salminen et al., 2020]. ВСП является одним из самых заметных процессов динамического взаимодействия между тропосферой и средней атмосферой. ВСП происходят в зимний период на высоких широтах. Зонально осредненный меридиональный градиент температуры, обычное направление которого зимой к экватору, во время ВСП меняет в стратосфере направление на противоположное. В случае главного (major) ВСП направленный на восток средний зональный ветер в среднеширотной стратосфере также меняет направление на противоположное. Влияние ВСП на формирование погодных аномалий и изменений климата в тропосфере активно изучается с начала XX века [Baldwin et al., 2007, 2001; Hong and Reichler, 2021; Nath et al., 2016; Sun and Robinson, 2009]. ВСП могут существенно влиять на динамику и термический режим верхней атмосферы [Fuller-Rowell et al., 2010; Pedatella and Liu, 2013; Pedatella et al., 2016], представляя собой важный предмет исследования вертикальных взаимодействий в атмосфере в глобальном масштабе.

Изменения амплитуд атмосферных приливов на разных стадиях ВСП изучались как на основе радарных данных [He et al., 2020; Hibbins et al., 2019], так и на базе численного моделирования [Limpasuvan et al., 2016; Pedatella and Liu, 2013] и спутниковых измерений [Siddiqui et al., 2022]. Отмечается существенная изменчивость в поведении приливов, в частности, при ВСП за последние годы наблюдались разнонаправленные тенденции в структурах приливов в МНТ области. Например, [He et al., 2020] по данным сети радарных станций диагностировали ослабление мигрирующего полусуточного прилива в мезосфере во время образования ВСП 2018 года. Однако по другим радарным данным были выявлены и обратные тенденции: усиление мигрирующего полусуточного прилива во время ВСП 2006 г. и 2009 гг., что, по-видимому, связано с изменениями стратосферного озона [Sridharan et al., 2012].

Цель данной работы – исследование влияния различных фаз ЭНЮК и КДК на изменение пространственно-временной структуры приливов на разных стадиях формирования ВСП на основе численного моделирования с использованием 3-мерной модели средней и верхней атмосферы МСВА.

Методы и подходы

Модель МСВА. Для моделирования общей атмосферной циркуляции в различные фазы ЭНЮК и КДК используется механистическая нелинейная численная модель общей циркуляции средней и верхней атмосферы МСВА [Pogoreltsev et al., 2007], активно используемая для изучения крупномасштабных волновых процессов [Geißler et al., 2020; Koval et al., 2022b; Medvedeva et al., 2019]. Конечно-разностная модель МСВА основана на решении уравнений гидродинамики в сферической системе координат, с горизонтальной сеткой 36×64 узлов по широте и долготе и 56 вертикальными уровнями от земной поверхности до примерно 300 км в log-изобарической системе координат. Модель МСВА адекватно воспроизводит структуру атмосферных приливов и многократно использовалась для изучения различных мод мигрирующих [Geißler et al., 2020; Lilienthal and Jacobi, 2019; Lilienthal et al., 2018] и немигрирующих [Суворова и Погорельцев, 2011] приливов. В модели генерация приливов происходит самосогласованно: за счет параметризации солнечного нагрева и нелинейных взаимодействий между гравитационными волнами и приливами. Пространственная структура моделируемых приливов в МСВА соответствует наблюдениям, хотя амплитуды могут быть недооценены, как и во многих других моделях [Lilienthal and Jacobi, 2019]. В текущей работе анализ сфокусирован на относительных изменениях амплитуд приливов.

Фазы КДК. Для определения КДК используется метод, основанный на рассмотрении вертикальной эволюции экваториального зонального ветра с использованием эмпирических ортогональных функций, предложенный в статье [Wallace et al., 1993] и реализованный нами ранее [Koval et al., 2022b]. Использование этого метода позволило подобрать годы, соответствующие восточной и западной фазам КДК. При численных расчетах для учета КДК в модели используется ньютоновская релаксация (nudging)

моделируемого среднезонального потока в экваториальной стратосфере к соответствующим осредненным распределениям на основе реанализа MERRA2 при различных фазах КДК.

Фазы ЭНЮК учтены в модели МСВА посредством внедрения в модель параметризации выделения скрытого тепла по методу, предложенному в работе [Ermakova et al., 2019]. Для выделения фаз ЭНЮК используется мультивариативный индекс (Multivariate ENSO Index, MEI, [Wolter and Timlin, 2011]). Используя таблицу значений MEI, выбираются годы, соответствующие фазам Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Осредненные по этим годам для отдельных сезонов поля температуры и геопотенциала используются в качестве начальных условий в МСВА.

ВСП. События ВСП генерируются в МСВА за счет внутренней изменчивости гидродинамических полей и нелинейных взаимодействий среднего течения с планетарными волнами. Адекватность воспроизведения главных и минорных ВСП моделью МСВА обсуждалась в более ранних работах, в частности, моделируемые события ВСП, схожие по пространственно-временным характеристикам с наблюдаемыми, продемонстрированы в работах [Koval et al., 2019; Medvedeva et al., 2019].

Для автоматизации и стандартизации поиска ВСП в работах [Гаврилов и Ефимов, 2021; Efimov and Gavrilov, 2023] разработан метод, основанный на поиске моментов максимальной скорости изменения (МСИ) температуры и средней зональной скорости во время события. В начале ВСП можно найти момент максимального роста температуры, t_T , когда первая производная по времени положительна и максимальна, а вторая производная одновременно равна нулю. Западный зональный ветер во время начала ВСП убывает и может менять направление. В момент максимальной скорости уменьшения зонального ветра, t_U , первая производная отрицательна, а вторая производная проходит нулевое значение. Необходимым условием экстремальной скорости роста и убывания является равенство нулю второй производной по времени.

Для проверки метода авторы в работе [Ефимов и Гаврилов, 2024] определили характеристики ВСП на высоте 30 км за период с 1958 по 2017 г по базе данных японского метеорологического реанализа JRA-55. Для уменьшения шума данные реанализа усреднялись по широтному кольцу 60° – 90° с.ш. Сравнение с временами начала 32 главных ВСП, t_R , традиционно найденных по времени разворота зонального ветра в таблице [Butler, 2023], показало, что среднее значение $t_R - t_U = 3.6 \pm 0.5$ сут, т.е. максимальная скорость уменьшения зонального ветра наблюдается раньше, чем разворот направления ветра. Среднее значение разности $t_U - t_T = 1.5 \pm 0.5$ сут, т.е. рост температуры опережает убывание зонального ветра во время ВСП. В конце события ВСП по аналогии с вышеизложенным можно найти моменты максимальной скорости убывания температуры и роста среднего зонального ветра, которые характеризуют время окончания события. Оценки длительности ВСП, определяемой как разность между указанными выше временами начала и окончания событий меняются в пределах 6–9 сут.

Схема численных экспериментов. При инициализации модели задаются климатологические глобальные профили температуры. В течение первых 120–129 дней МСВА использует среднесуточные скорости солнечного нагрева. Между 120 и 129 модельными днями включаются суточные вариации нагрева и источники планетарных волн. Начиная с 300-го модельного дня запускаются сезонные изменения зенитного угла Солнца, а дни 300–390 соответствуют декабрю–февралю. С целью обеспечения статистической значимости, для каждой комбинации КДК–ЭНЮК были рассчитаны композитные ВСП, состоящие из 6 событий в рамках ансамблей модельных реализаций. Особенности создания ансамблей в МСВА с целью получения осредненных распределений, стадии инициализации модели и статистическая обработка в деталях описаны в [Koval et al., 2019]. Среднемесячные амплитуды ПВ, интенсивность среднего потока и температура в стратосфере зимой от одного члена модельного ансамбля к другому могут существенно меняться, что интерпретируется как межгодовая изменчивость [Суворова и Погорельцев, 2011]. С помощью МСВА в данной работе исследуются средние «климати-

ческие» распределения гидродинамических полей, полученные в результате осреднения по ансамблям для комбинаций Эль-Ниньо и вКДК (восточная фаза КДК), Эль-Ниньо и зКДК (западная фаза КДК) и Ла-Нинья и вКДК (восточная фаза КДК).

Отметим, что из-за ограниченности непрерывных данных наблюдений средней и верхней атмосферы примерно 40–50 годами и тем, что рассматриваемые тропические осцилляции КДК и ЭНЮК долгопериодные, именно анализ результатов численных экспериментов имеет важное преимущество по сравнению с анализом данных наблюдений.

Результаты

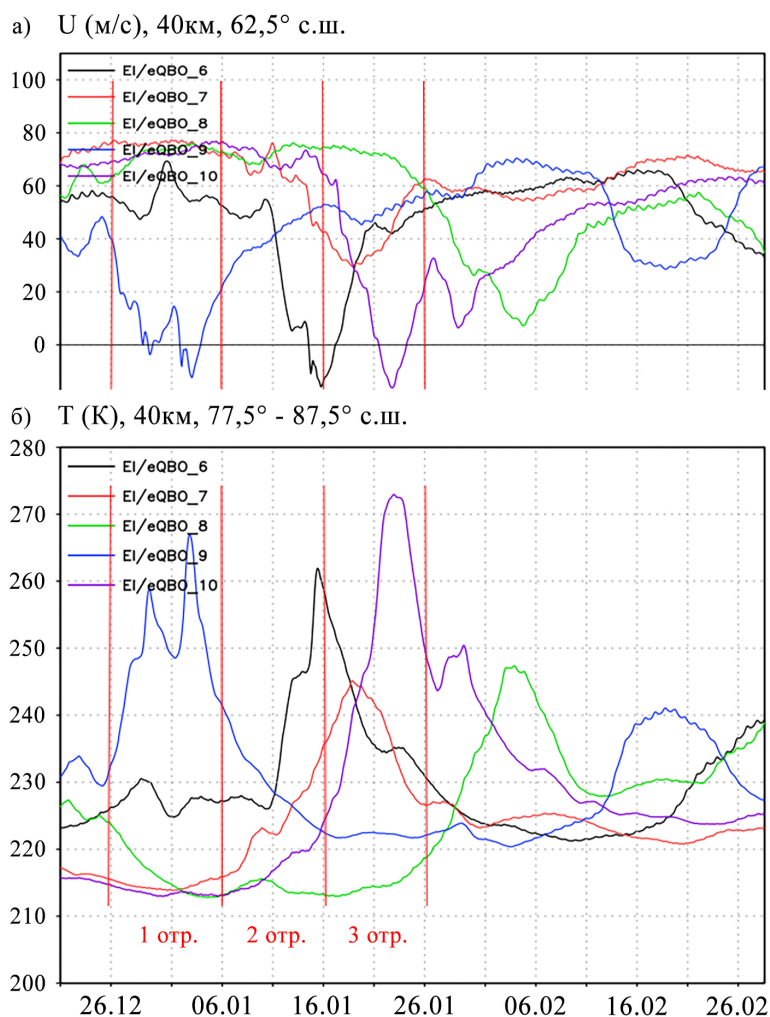


Рис. 1. Временной ход среднезонального зонального ветра на $62,5^\circ$ с.ш. (а) и температуры на $77,5^\circ - 87,5^\circ$ с.ш. (б) в течение зимних месяцев для разных членов ансамбля модельных расчетов. Вертикальными красными линиями показаны 10-дневные промежутки времени перед, во время и после ВСП на примере 6-го модельного расчета для Эль-Ниньо + вКДК (черная кривая).

Для изучения особенностей изменения структуры приливов на разных стадиях ВСП были выбраны 10-дневные интервалы времени перед, во время и после ВСП. Примеры временных рядов зонального ветра и температуры, смоделированных для зимних месяцев при комбинации Эль-Ниньо + вКДК представлены на рис. 1. Вертикальными красными линиями продемонстрированы 10-дневные промежутки времени на примере модельного расчета 6 (черная кривая). Первый промежуток соответствует состоянию перед началом ВСП. Второй промежуток между началом ВСП и его пи-

ком, сопровождающийся быстрым ростом приполярной стратосферной температуры и замедлением зонального ветра. Этот промежуток сопровождается, как правило, максимальной волновой активностью планетарных волн. Третий промежуток – временной интервал после пика ВСП. Всего, для трех комбинаций КДК и ЭНЮК было выбрано по 6 модельных расчетов, содержащих ВСП. Только для условий Ла-Нинья и зКДК не удалось выбрать соответствующее количество потеплений. Как обсуждалось выше, такая комбинация не способствует ослаблению стратосферного полярного вихря и, следовательно, формированию ВСП.

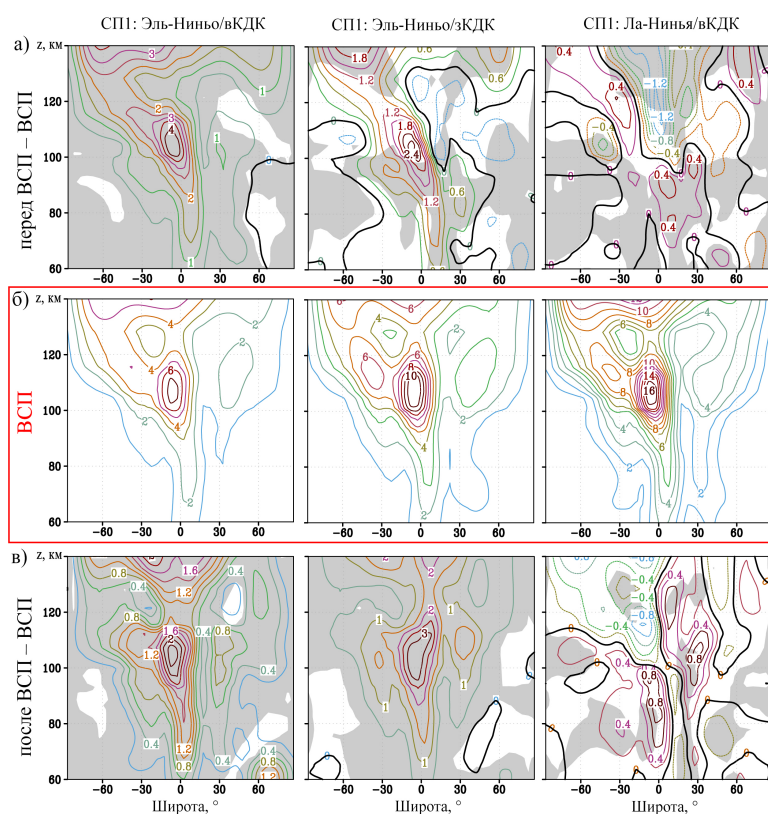


Рис. 2. Высотно-широтные распределения амплитуды вариаций температуры (К) суточного мигрирующего прилива ($m=1$) во время ВСП (б), а также изменения амплитуды перед (а) и после (в) ВСП. Столбцы слева направо соответствуют комбинациям Эль-Ниньо + вКДК, Эль-Ниньо + зКДК, Ла-Нинья + вКДК. Серым фоном выделены статистически значимые приращения.

Гидродинамические поля для каждого из выбранных временных интервалов и каждого модельного расчета внутри ансамбля были разложены на зональные гармоники с помощью Фурье-разложения. Далее, на основе аппроксимации по методу наименьших квадратов, рассчитывались амплитуды и фазы приливов. Для изучения особенностей изменения приливов на разных стадиях ВСП, полученные амплитуды были осреднены по соответствующим ансамблям. Были рассмотрены следующие приливы: мигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными волновыми числами, соответственно, 1 и 2, а также немигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными числами, соответственно, 2 и 1.

На рис. 2б представлены амплитуды суточного мигрирующего прилива для условий, соответственно (слева направо), Эль-Ниньо + вКДК; Эль-Ниньо + зКДК; Ла-Нинья + вКДК, во время ВСП. рис. 2а,в демонстрируют приращения соответствующих величин относительно периода ВСП. Видно, что в целом структура приливов восприимчива к воздействию ВСП во всех комбинациях. Структура суточного прилива характерна для бореальной зимы: максимум амплитуды вблизи экватора, в тропических широтах наблюдаются вторые максимумы, причем в южном полушарии амплитуда больше, чем

в северном. При этом видно, что во время ВСП амплитуды при разных комбинациях КДК – ЭНЮК меняются по-разному. Например, при Эль-Ниньо + вКДК (рис. 2, левая колонка) заметно ослабление суточного прилива во время ВСП, что демонстрируют положительные приращения амплитуды перед и после ВСП (рис. 2а, в). Такое поведение нехарактерно, например, для стационарных планетарных волн [например, Gavrilov et al., 2018], однако совпадает с предыдущими исследованиями [например, Siddiqui et al., 2022]. В частности, для отдельных рассмотренных ВСП [Siddiqui et al., 2022] обсуждали усиление прилива, продолжавшееся после события. Схожие тенденции после ВСП наблюдались также по данным SABER в 2009 году [Jin et al., 2012]. Максимальные изменения в амплитуде прилива (до 40%) во время ВСП наблюдаются также при фазе Эль-Ниньо + вКДК, хотя сам прилив слабее, чем в другие рассмотренные комбинации. Если рассматривать другие комбинации КДК/ЭНЮК, то при Эль-Ниньо + зКДК (рис. 2, средняя колонка) в северном полушарии наблюдается усиление прилива во время ВСП, в при Ла-Нинья + вКДК (рис. 2, правая колонка), амплитуда суточного прилива выше 90 км усиливается во время события, а после ВСП – ослабляется в южном полушарии.

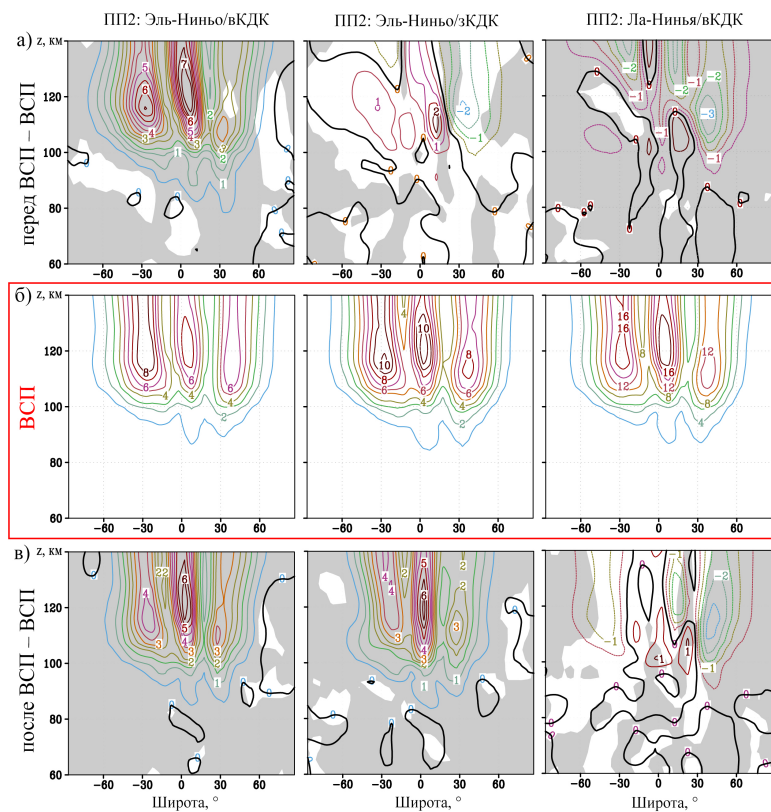


Рис. 3. Высотно-широтные распределения амплитуды вариаций температуры (К) полусуточного мигрирующего прилива ($m=2$) во время ВСП (б), а также изменения амплитуды перед (а) и после (в) ВСП. Столбцы слева направо соответствуют комбинациям Эль-Ниньо + вКДК, Эль-Ниньо + зКДК, Ла-Нинья + вКДК. Серым фоном выделены статистически значимые приращения.

На рис. 3 представлены те же величины, что на рис. 2, только для полусуточного мигрирующего прилива с зональным волновым числом $m = 2$. Выше 90 км амплитуда полусуточного прилива тоже имеет 3 максимума, в экваториальной и тропической областях, при этом амплитуды полусуточного прилива в экваториальной области на рис. 3б сопоставимы с амплитудами суточного прилива на рис. 2б, а за пределами экваториальной области амплитуды полусуточного прилива превышают показатели суточного. Такие особенности структуры мигрирующих приливов многократно обсуждались в исследованиях [He et al., 2020; Pedatella and Liu, 2013].

Перед потеплением, на рис. 3а, во всех комбинациях тенденции изменения прилива схожи с теми же для суточного прилива: усиление при Эль-Ниньо + вКДК, ослабление в северном полушарии при Эль-Ниньо + зКДК и общее ослабление для Ла-Нинья + вКДК. Усиление прилива после ВСП отмечено для первых двух комбинаций на рис. 3в (левая и средняя панели). Относительные изменения амплитуды, как и в случае суточного прилива, продемонстрированы на левых панелях на рис. 3 а, в, максимальны во время комбинации Эль-Ниньо + вКДК. В работе [He et al., 2020] авторы оценивали изменения в структуре приливов во время ВСП, включая суточные и полусуточные, на основе радарных данных о скорости ветра в среднеширотной МНТ области, и, в частности, демонстрировали ослабление полусуточного прилива во время ВСП, схожее с тем, что видно на левых панелях рис. 3 а, б. Ослабление полусуточного прилива также демонстрировалось в исследовании на базе обработки данных Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) [Hibbins et al., 2019]. Вместе с тем, изменчивость приливов во время ВСП зависит от множества факторов и при определенных условиях можно наблюдать усиление полусуточного прилива во время ВСП [Sridharan et al., 2012], схожее с нашими правыми панелями рис. 3а, б. Таким образом мы демонстрируем очень важный фактор, влияющий на изменчивость структуры приливов, выраженный в комбинации воздействия КДК – ЭНЮК.

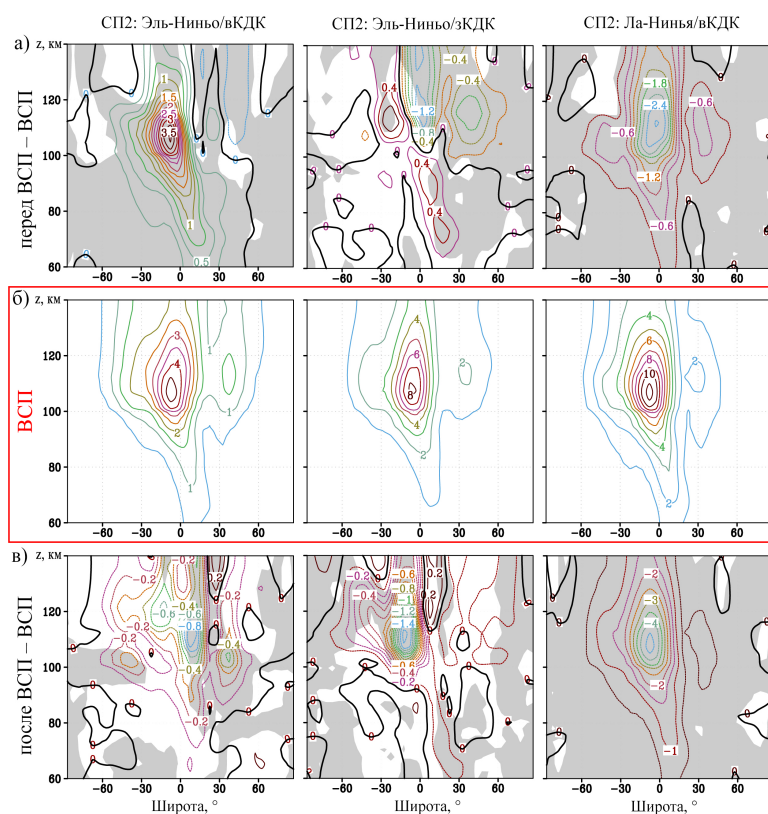


Рис. 4. Высотно-широтные распределения амплитуд вариаций температуры (К) посредством суточного немигрирующего прилива ($m = 2$) во время ВСП (б), а также изменения амплитуды перед (а) и после (в) ВСП. Столбцы слева направо соответствуют комбинациям Эль-Ниньо + вКДК, Эль-Ниньо + зКДК, Ла-Нинья + вКДК. Серым фоном выделены статистически значимые приращения.

Амплитуды суточного немигрирующего прилива (с зональным волновым числом 2) на разных стадиях ВСП представлены на рис. 4. Структура этого прилива схожа со структурой мигрирующего суточного прилива, показанного на рис. 2, что объясняется основным механизмом его генерации за счет нелинейного взаимодействия суточного прилива со стационарной планетарной волной с зональным числом 1 [Angelats i Coll and Forbes, 2002; Hagan and Forbes, 2002; Hagan et al., 1995]. Второй важный меха-

низм формирования немигрирующего прилива – зонально-асимметричное тепловое воздействие, обусловленное топографией поверхности, географически изменяющиеся источники тепла, изменение солнечного нагрева с долготой [Pancheva et al., 2020].

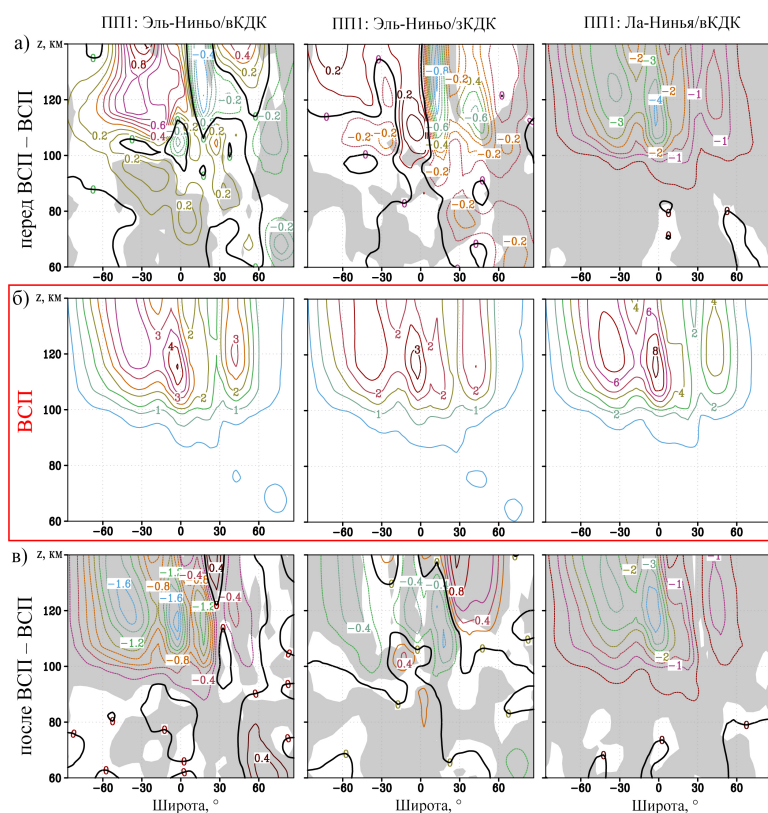


Рис. 5. Высотно-широтные распределения амплитуды вариаций температуры (К) посредством полусуточного немигрирующего прилива ($m = 1$) во время ВСП (б), а также изменения амплитуды перед (а) и после (в) ВСП. Столбцы слева направо соответствуют комбинациям Эль-Ниньо + вКДК, Эль-Ниньо + зКДК, Ла-Нинья + вКДК. Серым фоном выделены статистически значимые приращения.

На рис. 5 представлены структуры полусуточного немигрирующего прилива (с зональным волновым числом 1). Как и в случае суточного мигрирующего и немигрирующего приливов, структура полусуточного прилива на рис. 3 и рис. 5 в целом схожа. Амплитуды немигрирующих приливов заметно меньше, чем мигрирующих, при этом результат нелинейного взаимодействия первичного полусуточного мигрирующего прилива с планетарной волной выражается в существенном ослаблении немигрирующего прилива после ВСП при всех комбинациях. В случае Эль-Ниньо + вКДК и Ла-Нинья + вКДК это ослабление может достигать 50% в экваториальной области, на высоте около 120 км (левый и правый рис. 5в). В северной термосфере на среднем рис. 5в при Эль-Ниньо + зКДК после ВСП наблюдается увеличение амплитуды прилива, не характерное для других комбинаций. Если рассматривать тенденции перед ВСП, большая изменчивость приливов при Эль-Ниньо + вКДК и Эль-Ниньо + зКДК (левый и средний рис. 5а) объясняет отсутствие статистической значимости приращений амплитуды выше 100 км. Педателла и Форбс [Pedatella and Forbes, 2010], изучая вариации полного электронного содержания, предположили, что взаимодействие между мигрирующими полусуточным приливом и сильной активностью ПВ во время ВСП способствует усилению немигрирующего полусуточного прилива и ослаблению после ВСП. Рассмотренное ими ВСП 2009 года соответствует комбинации Эль-Ниньо + вКДК, представленной на наших рисунках слева. Усиление полусуточного немигрирующего прилива в северной нижней термосфере демонстрировалось также в [Hibbins et al., 2019].

Существенное отличие немигрирующего суточного прилива от мигрирующего прилива заключается в том, что после ВСП немигрирующий прилив ослабляется при всех комбинациях КДК/ЭНЮК. Это можно видеть по отрицательным приращением амплитуды после ВСП на рис. 4в. Это явление объясняется резким ослаблением волновой активности планетарной волны после прохождения пика ВСП. На рис. 6, продемонстрировано поведение стационарной ПВ с зональным числом 1 (СПВ1) на разных стадиях ВСП. Структура ПВ для всех комбинаций КДК/ЭНЮК (рис. 6б) типична для условий бореальной зимы: в стратосфере наблюдается максимум в северном полушарии, начиная с мезосферы, ПВ распространяется вдоль волновода и в южное полушарие. Именно резким усилением волновой активности СПВ объясняется формирование ВСП, следовательно, перед и после события амплитуда СПВ на рис. 6а, в уменьшается. Таким образом, ослабляется и процесс генерации немигрирующего прилива за счет нелинейного взаимодействия мигрирующего прилива с планетарной волной. Схожее поведение немигрирующего прилива после ВСП обсуждалось в исследовании [Pedatella and Liu, 2013], в котором проводилось численное моделирование влияния глобальных атмосферных волн и приливов на ионосферные неоднородности во время ВСП.

Заключение

Данная работа посвящена изучению эволюции атмосферных приливов в период ВСП в Арктике в условиях различных фаз долгопериодных тропических осцилляций: квазидвухлетнего колебания зонального ветра в экваториальной стратосфере (КДК) и Эль-Ниньо Южного колебания (ЭНЮК) на основе численных расчетов циркуляции

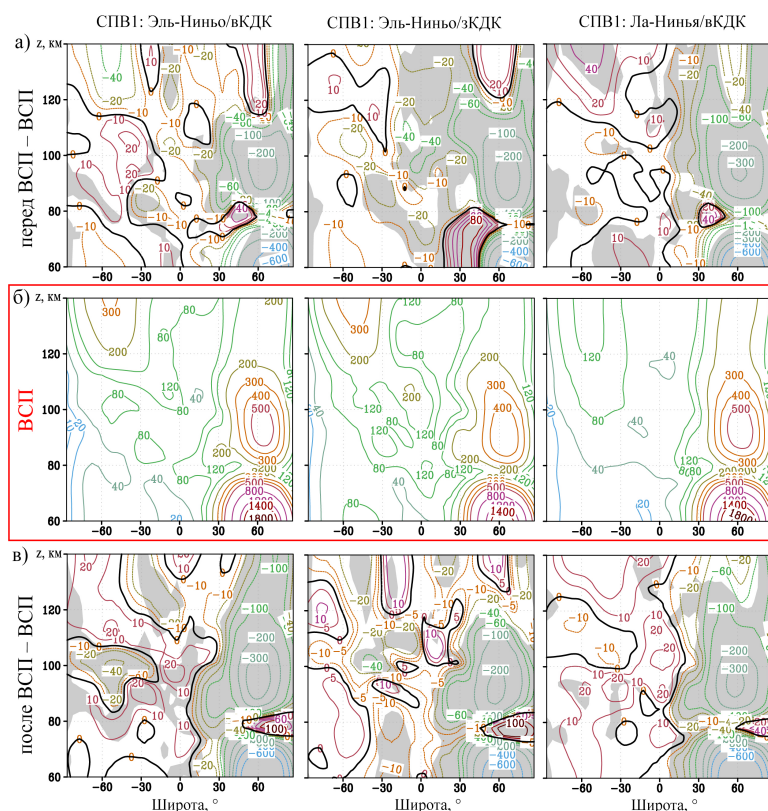


Рис. 6. Высотно-широтные распределения амплитуды вариаций геопотенциальной высоты (гпм) посредством стационарной ПВ ($m = 1$) во время ВСП (б), а также изменения амплитуды перед (а) и после (в) ВСП. Столбцы слева направо соответствуют комбинациям Эль-Ниньо + вКДК, Эль-Ниньо + зКДК, Ла-Нинья + вКДК. Серым фоном выделены статистически значимые приращения.

атмосферы, проведенных с использованием МСВА. Эволюция приливов рассматривалась на примере трех 10-дневных интервалов времени перед, во время и после ВСП. В исследовании рассматриваются мигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными волновыми числами, соответственно, 1 и 2, а также немигрирующие суточный и полусуточный приливы с зональными числами, соответственно, 2 и 1.

Были получены следующие основные результаты:

- Структура приливов восприимчива к воздействию ВСП во всех случаях, при этом во время ВСП амплитуды при разных комбинациях КДК – ЭНЮК меняются по-разному. Например, при Эль-Ниньо + вКДК заметно ослабление суточного мигрирующего прилива во время ВСП, а при Ла-Нинья + вКДК, наоборот, амплитуда суточного прилива усиливается во время события, а после ВСП – ослабляется.
- Перед потеплением во всех комбинациях тенденции изменения полусуточного мигрирующего прилива схожи с теми же для суточного прилива: усиление при Эль-Ниньо + вКДК, ослабление в северном полушарии при Эль-Ниньо + зКДК и общее ослабление для Ла-Нинья + вКДК. Относительные изменения амплитуды, как и в случае суточного прилива, максимальны во время комбинации Эль-Ниньо + вКДК.
- Если рассматривать немигрирующие суточный и полусуточный приливы, то существенное отличие от мигрирующих приливов заключается в том, что после ВСП немигрирующий прилив ослабляется при всех комбинациях КДК – ЭНЮК. Это явление можно объяснить резким ослаблением волновой активности планетарной волны после прохождения пика ВСП. В связи с этим, ослабляется и процесс нелинейной генерации немигрирующего прилива.
- Сравнение рассчитанных нами амплитуд приливов с данными наблюдений для отдельных комбинаций КДК – ЭНЮК, а также на разных стадиях ВСП, продемонстрировало адекватность используемой нами методологии и корректность воспроизведения рассматриваемых колебаний в модели МСВА.

Проведенные расчеты амплитуд приливов на разных стадиях ВСП показали, что изменение структуры глобальной циркуляции в мезосфере-нижней термосфере может оказывать существенное влияние на такие крупномасштабные возмущения. При определенных условиях, например, во время главного ВСП, амплитуда прилива может меняться в 2–3 раза, способствуя изменению температурного и динамического баланса атмосферы. Важность изучения взаимодействия приливов с долгопериодными атмосферными осцилляциями связана с тем, что кроме непосредственного обмена импульсом со средним течением, приливы участвуют в нелинейных взаимодействиях с планетарными волнами, являясь потенциальным механизмом передачи энергии этих возмущений планетарного масштаба (в частности, квазистационарных планетарных волн) из средней атмосферы в термосферу/ионосферу.

Выявленное в ходе численных экспериментов отличие в термической и динамической структуре верхней атмосферы обоих полушарий при разных комбинациях естественных тропических осцилляций является важным результатом. Эти осцилляции, например, могут объяснять существенную изменчивость приливов на разных стадиях ВСП в верхней атмосфере, многократно обсуждаемую в более ранних работах, и выражаемую, например, в усилении/ослаблении полусуточного прилива во время ВСП. В частности, в работе [Medvedeva et al., 2019] обсуждается возможная связь немигрирующих приливов в МНТ области с вариациями вертикальной компоненты ветра во время ВСП. В связи с этим, дальнейшие исследования в направлении прямого воздействия приливов на атмосферные циркуляционные потоки представляются наиболее перспективными в ближайшее время.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00230, <https://rscf.ru/project/24-17-00230/>.







Список литературы

- Варгин П. Н., Коленникова М. А., Кострыкин С. В. и др. Влияние аномалий температуры поверхности экваториальной и северной части Тихого океана на стратосферу Арктики по расчетам климатической модели ИВМ РАН // *Метеорология и гидрология*. — 2021. — № 1. — С. 5–16. — DOI: [10.52002/0130-2906-2021-1-5-16](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-1-5-16).
- Гаврилов Н. М., Ефимов М. М. Автоматизированное определение дат внезапных стратосферных потеплений // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVII Международного симпозиума. Конференция Е. Физика средней и верхней атмосферы*. — Томск : ИОА СО РАН, 2021. — Е26–Е29.
- Ефимов М. М., Гаврилов Н. М. Верификация метода максимумов скорости изменения атмосферных параметров для определения характеристик внезапных стратосферных потеплений // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXX Международного симпозиума. Конференция Е. Физика средней и верхней атмосферы*. — Томск : ИОА СО РАН, 2024. — DOI: [10.56820/ОАО30Е1](https://doi.org/10.56820/ОАО30Е1).
- Коленникова М. П., Варгин П. Н., Гущина Д. Ю. Взаимосвязи между индексами Эль-Ниньо и основными характеристиками полярной стратосферы по данным моделей CMIP5 и реанализа // *Метеорология и гидрология*. — 2021. — № 6. — С. 5–23. — DOI: [10.52002/0130-2906-2021-6-5-23](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-6-5-23).
- Суворова Е. В., Погорельцев А. И. Моделирование немигрирующих приливов в средней атмосфере // *Геомагнетизм и аэрономия*. — 2011. — Т. 51, № 1. — С. 107–118.
- Angelats i Coll M., Forbes J. M. Nonlinear interactions in the upper atmosphere: The $s = 1$ and $s = 3$ nonmigrating semidiurnal tides // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2002. — Vol. 107, A8. — DOI: [10.1029/2001ja900179](https://doi.org/10.1029/2001ja900179).
- Baldwin M. P., Dameris M., Shepherd T. G. How will the stratosphere affect climate change? // *Science*. — 2007. — Vol. 316, no. 5831. — P. 1576–1577. — DOI: [10.1126/science.1144303](https://doi.org/10.1126/science.1144303).
- Baldwin M. P., Gray L. J., Dunkerton T. J., et al. The quasi-biennial oscillation // *Reviews of Geophysics*. — 2001. — Vol. 39, no. 2. — P. 179–229. — DOI: [10.1029/1999rg000073](https://doi.org/10.1029/1999rg000073).
- Butler A. H. SSWC: Sudden Stratospheric Warming Compendium data set. Table of major mid-winter SSWs in reanalysis products. — 2023. — (accessed: 20.03.2024) ; (in English). <https://csl.noaa.gov/groups/csl8/sswcompendium/majorevents.html>.
- Efimov M. M., Gavrilov N. M. Determination of sudden stratospheric warming dates and their classification according to the JRA-55 reanalysis data // *29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. — SPIE, 2023. — P. 172. — DOI: [10.1117/12.2690514](https://doi.org/10.1117/12.2690514).
- Ermakova T. S., Aniskina O. G., Statnaia I. A., et al. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // *Earth, Planets and Space*. — 2019. — Vol. 71, no. 8. — DOI: [10.1186/s40623-019-0987-9](https://doi.org/10.1186/s40623-019-0987-9).
- Ermakova T. S., Koval A., Didenko K., et al. Influence of Natural Tropical Oscillations on Ozone Content and Meridional Circulation in the Boreal Winter Stratosphere // *Atmosphere*. — 2024. — Vol. 15, no. 6. — P. 717. — DOI: [10.3390/atmos15060717](https://doi.org/10.3390/atmos15060717).
- Ermakova T. S., Koval A. V., Smyshlyaev S. P., et al. Manifestations of Different El Niño Types in the Dynamics of the Extratropical Stratosphere // *Atmosphere*. — 2022. — Vol. 13, no. 12. — P. 2111. — DOI: [10.3390/atmos13122111](https://doi.org/10.3390/atmos13122111).
- Forbes J. M. Atmospheric tides: 1. Model description and results for the solar diurnal component // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 1982. — Vol. 87, A7. — P. 5222–5240. — DOI: [10.1029/ja087ia07p05222](https://doi.org/10.1029/ja087ia07p05222).
- Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., et al. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2010. — Vol. 115, A10. — DOI: [10.1029/2010ja015524](https://doi.org/10.1029/2010ja015524).
- Gan Q., Du J., Fomichev V. I., et al. Temperature responses to the 11 year solar cycle in the mesosphere from the 31 year (1979-2010) extended Canadian Middle Atmosphere Model simulations and a comparison with the 14 year (2002-2015) TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2017. — Vol. 122, no. 4. — P. 4801–4818. — DOI: [10.1002/2016JA023564](https://doi.org/10.1002/2016JA023564).
- Garfinkel C. I., Hartmann D. L. Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the Quasi-Biennial Oscillation on polar temperatures in the stratosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2007. — Vol. 112, no. D19. — DOI: [10.1029/2007jd008481](https://doi.org/10.1029/2007jd008481).
- Gavrilov N. M., Koval A. V., Pogoreltsev A. I., et al. Simulating planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different mountain wave scenarios // *Advances in Space Research*. — 2018. — Vol. 61, no. 7. — P. 1819–1836. — DOI: [10.1016/j.asr.2017.08.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.022).
- Geißler Ch., Jacobi Ch., Lilienthal F. Forcing mechanisms of the migrating quarterdiurnal tide // *Annales Geophysicae*. — 2020. — Vol. 38, no. 2. — P. 527–544. — DOI: [10.5194/angeo-38-527-2020](https://doi.org/10.5194/angeo-38-527-2020).

- Hagan M. E., Forbes J. M. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2002. — Vol. 107, no. D24. — DOI: [10.1029/2001jd001236](https://doi.org/10.1029/2001jd001236).
- Hagan M. E., Forbes J. M., Vial F. On modeling migrating solar tides // *Geophysical Research Letters*. — 1995. — Vol. 22, no. 8. — P. 893–896. — DOI: [10.1029/95gl00783](https://doi.org/10.1029/95gl00783).
- He M., Forbes J. M., Chau J. L., et al. High-Order Solar Migrating Tides Quench at SSW Onsets // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, no. 6. — DOI: [10.1029/2019gl086778](https://doi.org/10.1029/2019gl086778).
- Hibbins R. E., Espy P. J., Orsolini Y. J., et al. SuperDARN Observations of Semidiurnal Tidal Variability in the MLT and the Response to Sudden Stratospheric Warming Events // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2019. — Vol. 124, no. 9. — P. 4862–4872. — DOI: [10.1029/2018jd030157](https://doi.org/10.1029/2018jd030157).
- Hitchman M. H., Yoden S., Haynes P. H., et al. An Observational History of the Direct Influence of the Stratospheric Quasi-biennial Oscillation on the Tropical and Subtropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere // *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*. — 2021. — Vol. 99, no. 2. — P. 239–267. — DOI: [10.2151/jmsj.2021-012](https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-012).
- Holton J. R., Tan H. C. The Influence of the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation on the Global Circulation at 50 mb // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1980. — Vol. 37, no. 10. — P. 2200–2208. — DOI: [10.1175/1520-0469\(1980\)037<2200:tioteq>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2200:tioteq>2.0.co;2).
- Hong H.-J., Reichler T. Local and remote response of ozone to Arctic stratospheric circulation extremes // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2021. — Vol. 21, no. 2. — P. 1159–1171. — DOI: [10.5194/acp-21-1159-2021](https://doi.org/10.5194/acp-21-1159-2021).
- Jacobi C., Portnyagin Y., Solovjova T., et al. Climatology of the semidiurnal tide at 52–56°N from ground-based radar wind measurements 1985–1995 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1999. — Vol. 61, no. 13. — P. 975–991. — DOI: [10.1016/s1364-6826\(99\)00065-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(99)00065-6).
- Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., et al. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2012. — Vol. 117, A10. — DOI: [10.1029/2012ja017650](https://doi.org/10.1029/2012ja017650).
- Koval A. V., Gavrilov N. M., Kandieva K. K., et al. Numerical simulation of stratospheric QBO impact on the planetary waves up to the thermosphere // *Scientific Reports*. — 2022a. — Vol. 12, no. 1. — DOI: [10.1038/s41598-022-26311-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-26311-x).
- Koval A. V., Gavrilov N. M., Pogoreltsev A. I., et al. Reactions of the Middle Atmosphere Circulation and Stationary Planetary Waves on the Solar Activity Effects in the Thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2019. — Vol. 124, no. 12. — P. 10645–10658. — DOI: [10.1029/2019ja027392](https://doi.org/10.1029/2019ja027392).
- Koval A. V., Gavrilov N. M., Pogoreltsev A. I., et al. Dynamical Impacts of Stratospheric QBO on the Global Circulation up to the Lower Thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2022b. — Vol. 127, no. 4. — DOI: [10.1029/2021jd036095](https://doi.org/10.1029/2021jd036095).
- Kumar V., Yoden S., Hitchman M. H. QBO and ENSO Effects on the Mean Meridional Circulation, Polar Vortex, Subtropical Westerly Jets, and Wave Patterns During Boreal Winter // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2022. — Vol. 127, no. 15. — DOI: [10.1029/2022jd036691](https://doi.org/10.1029/2022jd036691).
- Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2006. — Vol. 68, no. 3–5. — P. 479–497. — DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).
- Lilienthal F., Jacobi C. Nonlinear forcing mechanisms of the migrating terdiurnal solar tide and their impact on the zonal mean circulation // *Annales Geophysicae*. — 2019. — Vol. 37, no. 5. — P. 943–953. — DOI: [10.5194/angeo-37-943-2019](https://doi.org/10.5194/angeo-37-943-2019).
- Lilienthal F., Jacobi C., Geißler C. Forcing mechanisms of the terdiurnal tide // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2018. — Vol. 18, no. 21. — P. 15725–15742. — DOI: [10.5194/acp-18-15725-2018](https://doi.org/10.5194/acp-18-15725-2018).
- Limpasuvan V., Orsolini Y. J., Chandran A., et al. On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2016. — Vol. 121, no. 9. — P. 4518–4537. — DOI: [10.1002/2015jd024401](https://doi.org/10.1002/2015jd024401).
- Ma Xuan, Wang Lei, Smith Doug, et al. ENSO and QBO modulation of the relationship between Arctic sea ice loss and Eurasian winter climate // *Environmental Research Letters*. — 2022. — Vol. 17, no. 12. — DOI: [10.1088/1748-9326/aca4e9](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca4e9).
- Manson A., Meek C., Teitelbaum H., et al. Climatologies of semi-diurnal and diurnal tides in the middle atmosphere (70–110 km) at middle latitudes (40–55°) // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1989. — Vol. 51, no. 7/8. — P. 579–593. — DOI: [10.1016/0021-9169\(89\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90056-1).

- Medvedeva I. V., Semenov A. I., Pogoreltsev A. I., et al. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2019. — Vol. 187. — P. 22–32. — DOI: [10.1016/j.jastp.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.005).
- Nath D., Chen W., Zelin C., et al. Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection // *Scientific Reports*. — 2016. — Vol. 6, no. 1. — DOI: [10.1038/srep24174](https://doi.org/10.1038/srep24174).
- Pancheva D., Mitchell N., Hagan M., et al. Global-scale tidal structure in the mesosphere and lower thermosphere during the PSMOS campaign of June–August 1999 and comparisons with the global-scale wave model // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2002. — Vol. 64, no. 8–11. — P. 1011–1035. — DOI: [10.1016/s1364-6826\(02\)00054-8](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(02)00054-8).
- Pancheva D., Mukhtarov P., Hall C., et al. Climatology of the main (24-h and 12-h) tides observed by meteor radars at Svalbard and Tromsø: Comparison with the models CMAM-DAS and WACCM-X // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2020. — Vol. 207. — P. 105339. — DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105339](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105339).
- Pedatella N. M., Forbes J. M. Evidence for stratosphere sudden warming-ionosphere coupling due to vertically propagating tides // *Geophysical Research Letters*. — 2010. — Vol. 37, no. 11. — DOI: [10.1029/2010gl043560](https://doi.org/10.1029/2010gl043560).
- Pedatella N. M., Liu H.-L. The influence of atmospheric tide and planetary wave variability during sudden stratosphere warmings on the low latitude ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2013. — Vol. 118, no. 8. — P. 5333–5347. — DOI: [10.1002/jgra.50492](https://doi.org/10.1002/jgra.50492).
- Pedatella N. M., Richmond A. D., Maute A., et al. Impact of semidiurnal tidal variability during SSWs on the mean state of the ionosphere and thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2016. — Vol. 121, no. 8. — P. 8077–8088. — DOI: [10.1002/2016ja022910](https://doi.org/10.1002/2016ja022910).
- Pogoreltsev A. I., Vlasov A. A., Fröhlich K., et al. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2007. — Vol. 69, no. 17/18. — P. 2083–2101. — DOI: [10.1016/j.jastp.2007.05.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.05.014).
- Salminen A., Asikainen T., Maliniemi V., et al. Dependence of Sudden Stratospheric Warmings on Internal and External Drivers // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, no. 5. — DOI: [10.1029/2019GL086444](https://doi.org/10.1029/2019GL086444).
- Siddiqui T. A., Chau J. L., Stolle C., et al. Migrating solar diurnal tidal variability during Northern and Southern Hemisphere Sudden Stratospheric Warmings // *Earth, Planets and Space*. — 2022. — Vol. 74, no. 1. — DOI: [10.1186/s40623-022-01661-y](https://doi.org/10.1186/s40623-022-01661-y).
- Smith A. K. Global Dynamics of the MLT // *Surveys in Geophysics*. — 2012. — Vol. 33, no. 6. — P. 1177–1230. — DOI: [10.1007/s10712-012-9196-9](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9196-9).
- Sridharan S., Sathishkumar S., Gurubaran S. Variabilities of mesospheric tides during sudden stratospheric warming events of 2006 and 2009 and their relationship with ozone and water vapour // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2012. — Vol. 78/79. — P. 108–115. — DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.013).
- Sun L., Robinson W. A. Downward influence of stratospheric final warming events in an idealized model // *Geophysical Research Letters*. — 2009. — Vol. 36, no. 3. — DOI: [10.1029/2008gl036624](https://doi.org/10.1029/2008gl036624).
- Trenberth K. E. The Definition of El Niño // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 1997. — Vol. 78, no. 12. — P. 2771–2777. — DOI: [10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:tdoen>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:tdoen>2.0.co;2).
- Wallace J. M., Panetta R. L., Estberg J. Representation of the Equatorial Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation in EOF Phase Space // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1993. — Vol. 50, no. 12. — P. 1751–1762. — DOI: [10.1175/1520-0469\(1993\)050<1751:rotesq>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<1751:rotesq>2.0.co;2).
- Wang C., Deser C., Yu J.-Y., et al. El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review // *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*. — Springer Netherlands, 2016. — P. 85–106. — DOI: [10.1007/978-94-017-7499-4_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4).
- Wolter K., Timlin M. S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext) // *International Journal of Climatology*. — 2011. — Vol. 31, no. 7. — P. 1074–1087. — DOI: [10.1002/joc.2336](https://doi.org/10.1002/joc.2336).
- Xu J., Smith A. K., Jiang G., et al. Features of the seasonal variation of the semidiurnal, terdiurnal and 6-h components of ozone heating evaluated from Aura/MLS observations // *Annales Geophysicae*. — 2012. — Vol. 30, no. 2. — P. 259–281. — DOI: [10.5194/angeo-30-259-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-259-2012).

NUMERICAL MODELING OF THE IMPACT OF NATURAL TROPICAL OSCILLATIONS ON THE AMPLITUDES OF ATMOSPHERIC TIDES DURING SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING

A. V. Koval,^{**1,2} , P. N. Vargin^{2,3} , N. M. Gavrilov¹ , K. A. Didenko^{1,4} ,
T. S. Ermakova^{1,2} , M. M. Efimov¹, and A. V. Sokolov¹ 

¹St. Petersburg University, St. Petersburg, Russia

²Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³Central Aerological Observatory, Dolgoprudny, Moscow, Russia

⁴Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation named after N. V. Pushkov RAS (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

**Correspondence to: Andrey Koval, a.v.koval@spbu.ru

In order to study the evolution of atmospheric tides, model simulations of the general atmospheric circulation were carried out using a 3-dimensional nonlinear mechanistic model “MUAM”. The following are considered as natural tropical oscillations: the quasi-biennial oscillation of the equatorial zonal wind (QBO) in the stratosphere and the El Niño Southern Oscillation (ENSO). Changes in tidal amplitudes are analyzed at three 10-day time intervals before, during and after a sudden stratospheric warming (SSW). Composite SSWs consisting of 6 events within the calculation ensembles are considered for each QBO/ENSO combination. Migrating and non-migrating diurnal and semi-diurnal tides with zonal wave numbers 1 and 2 are studied. Numerical experiments have shown in particular, that the structure of tides is susceptible to the effects of SSW, while during SSWs the amplitudes of tides for different combinations of QBO – ENSO change differently. For example, during El Niño and the easterly QBO phase, there is a noticeable weakening of the diurnal migrating tide during the SSW, while during La Niña and the easterly QBO phase, on the contrary, the amplitude of the diurnal tide increases during the event, and after the SSW it weakens. Analysis of numerical experiments confirms existing ideas about significant variability of tides during SSW and demonstrates the most important source of this variability associated with combinations of QBO-ENSO dynamic effects.

Keywords: Atmospheric dynamics, atmospheric tides, tropical oscillations, sudden stratospheric warming.

Citation: Koval, A. V., P. N. Vargin, N. M. Gavrilov, K. A. Didenko, T. S. Ermakova, M. M. Efimov, and A. V. Sokolov (2025), Numerical Modeling of the Impact of Natural Tropical Oscillations on the Amplitudes of Atmospheric Tides During Sudden Stratospheric Warming, *Russian Journal of Earth Sciences*, 25, ES1007, <https://doi.org/10.2205/2025ES000939>, EDN: SXAGIY

Received: 1 July 2024

Accepted: 8 October 2024

Published: 28 February 2025



© 2025. The Authors.

References

- Angelats i Coll M., Forbes J. M. Nonlinear interactions in the upper atmosphere: The $s = 1$ and $s = 3$ nonmigrating semidiurnal tides // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2002. — Vol. 107, A8. — DOI: [10.1029/2001ja900179](https://doi.org/10.1029/2001ja900179).
- Baldwin M. P., Dameris M., Shepherd T. G. How will the stratosphere affect climate change? // *Science*. — 2007. — Vol. 316, no. 5831. — P. 1576–1577. — DOI: [10.1126/science.1144303](https://doi.org/10.1126/science.1144303).
- Baldwin M. P., Gray L. J., Dunkerton T. J., et al. The quasi-biennial oscillation // *Reviews of Geophysics*. — 2001. — Vol. 39, no. 2. — P. 179–229. — DOI: [10.1029/1999rg000073](https://doi.org/10.1029/1999rg000073).
- Butler A. H. SSWC: Sudden Stratospheric Warming Compendium data set. Table of major mid-winter SSWs in reanalysis products. — 2023. — (accessed: 20.03.2024). <https://csl.noaa.gov/groups/csl8/sswcompendium/majorevents.html>.

- Efimov M. M., Gavrilov N. M. Determination of sudden stratospheric warming dates and their classification according to the JRA-55 reanalysis data // 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. — SPIE, 2023. — P. 172. — DOI: [10.1117/12.2690514](https://doi.org/10.1117/12.2690514).
- Efimov M. M., Gavrilov N. M. Verification of the Maxima of the Rate of Change of Atmospheric Parameters Method for Determining the Characteristics of Sudden Stratospheric Warmings // XXX International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics". — Tomsk : IAO SB RAS, 2024. — DOI: [10.56820/OAO30E1](https://doi.org/10.56820/OAO30E1). — (In Russian).
- Ermakova T. S., Aniskina O. G., Statnaia I. A., et al. Simulation of the ENSO influence on the extra-tropical middle atmosphere // Earth, Planets and Space. — 2019. — Vol. 71, no. 8. — DOI: [10.1186/s40623-019-0987-9](https://doi.org/10.1186/s40623-019-0987-9).
- Ermakova T. S., Koval A., Didenko K., et al. Influence of Natural Tropical Oscillations on Ozone Content and Meridional Circulation in the Boreal Winter Stratosphere // Atmosphere. — 2024. — Vol. 15, no. 6. — P. 717. — DOI: [10.3390/atmos15060717](https://doi.org/10.3390/atmos15060717).
- Ermakova T. S., Koval A. V., Smyshlyaev S. P., et al. Manifestations of Different El Niño Types in the Dynamics of the Extratropical Stratosphere // Atmosphere. — 2022. — Vol. 13, no. 12. — P. 2111. — DOI: [10.3390/atmos13122111](https://doi.org/10.3390/atmos13122111).
- Forbes J. M. Atmospheric tides: 1. Model description and results for the solar diurnal component // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 1982. — Vol. 87, A7. — P. 5222–5240. — DOI: [10.1029/ja087ia07p05222](https://doi.org/10.1029/ja087ia07p05222).
- Fuller-Rowell T., Wu F., Akmaev R., et al. A whole atmosphere model simulation of the impact of a sudden stratospheric warming on thermosphere dynamics and electrodynamics // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2010. — Vol. 115, A10. — DOI: [10.1029/2010ja015524](https://doi.org/10.1029/2010ja015524).
- Gan Q., Du J., Fomichev V. I., et al. Temperature responses to the 11 year solar cycle in the mesosphere from the 31 year (1979-2010) extended Canadian Middle Atmosphere Model simulations and a comparison with the 14 year (2002-2015) TIMED/SABER observations // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2017. — Vol. 122, no. 4. — P. 4801–4818. — DOI: [10.1002/2016JA023564](https://doi.org/10.1002/2016JA023564).
- Garfinkel C. I., Hartmann D. L. Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the Quasi-Biennial Oscillation on polar temperatures in the stratosphere // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2007. — Vol. 112, no. D19. — DOI: [10.1029/2007jd008481](https://doi.org/10.1029/2007jd008481).
- Gavrilov N. M., Efimov M. M. Automated Determination of Dates of Sudden Stratospheric Warmings // XXVII International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics". — Tomsk : IAO SB RAS, 2021. — E26–E29. — (In Russian).
- Gavrilov N. M., Koval A. V., Pogoreltsev A. I., et al. Simulating planetary wave propagation to the upper atmosphere during stratospheric warming events at different mountain wave scenarios // Advances in Space Research. — 2018. — Vol. 61, no. 7. — P. 1819–1836. — DOI: [10.1016/j.asr.2017.08.022](https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.08.022).
- Geißler Ch., Jacobi Ch., Lilienthal F. Forcing mechanisms of the migrating quarterdiurnal tide // Annales Geophysicae. — 2020. — Vol. 38, no. 2. — P. 527–544. — DOI: [10.5194/angeo-38-527-2020](https://doi.org/10.5194/angeo-38-527-2020).
- Hagan M. E., Forbes J. M. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2002. — Vol. 107, no. D24. — DOI: [10.1029/2001jd001236](https://doi.org/10.1029/2001jd001236).
- Hagan M. E., Forbes J. M., Vial F. On modeling migrating solar tides // Geophysical Research Letters. — 1995. — Vol. 22, no. 8. — P. 893–896. — DOI: [10.1029/95gl00783](https://doi.org/10.1029/95gl00783).
- He M., Forbes J. M., Chau J. L., et al. High-Order Solar Migrating Tides Quench at SSW Onsets // Geophysical Research Letters. — 2020. — Vol. 47, no. 6. — DOI: [10.1029/2019gl086778](https://doi.org/10.1029/2019gl086778).
- Hibbins R. E., Espy P. J., Orsolini Y. J., et al. SuperDARN Observations of Semidiurnal Tidal Variability in the MLT and the Response to Sudden Stratospheric Warming Events // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2019. — Vol. 124, no. 9. — P. 4862–4872. — DOI: [10.1029/2018jd030157](https://doi.org/10.1029/2018jd030157).
- Hitchman M. H., Yoden S., Haynes P. H., et al. An Observational History of the Direct Influence of the Stratospheric Quasi-biennial Oscillation on the Tropical and Subtropical Upper Troposphere and Lower Stratosphere // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. — 2021. — Vol. 99, no. 2. — P. 239–267. — DOI: [10.2151/jmsj.2021-012](https://doi.org/10.2151/jmsj.2021-012).
- Holton J. R., Tan H. C. The Influence of the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation on the Global Circulation at 50 mb // Journal of the Atmospheric Sciences. — 1980. — Vol. 37, no. 10. — P. 2200–2208. — DOI: [10.1175/1520-0469\(1980\)037<2200:tioteq>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2200:tioteq>2.0.co;2).
- Hong H.-J., Reichler T. Local and remote response of ozone to Arctic stratospheric circulation extremes // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2021. — Vol. 21, no. 2. — P. 1159–1171. — DOI: [10.5194/acp-21-1159-2021](https://doi.org/10.5194/acp-21-1159-2021).

- Jacobi C., Portnyagin Y., Solovjova T., et al. Climatology of the semidiurnal tide at 52–56°N from ground-based radar wind measurements 1985–1995 // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1999. — Vol. 61, no. 13. — P. 975–991. — DOI: [10.1016/s1364-6826\(99\)00065-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(99)00065-6).
- Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., et al. Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere-ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2012. — Vol. 117, A10. — DOI: [10.1029/2012ja017650](https://doi.org/10.1029/2012ja017650).
- Kolennikova M. A., Vargin P. N., Gushchina D. Yu. Interrelations between El Niño Indices and Major Characteristics of Polar Stratosphere According to CMIP5 Models and Reanalysis // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — Vol. 46, no. 6. — P. 351–364. — DOI: [10.3103/s1068373921060017](https://doi.org/10.3103/s1068373921060017).
- Koval A. V., Gavrilov N. M., Kandieva K. K., et al. Numerical simulation of stratospheric QBO impact on the planetary waves up to the thermosphere // *Scientific Reports*. — 2022a. — Vol. 12, no. 1. — DOI: [10.1038/s41598-022-26311-x](https://doi.org/10.1038/s41598-022-26311-x).
- Koval A. V., Gavrilov N. M., Pogoreltsev A. I., et al. Reactions of the Middle Atmosphere Circulation and Stationary Planetary Waves on the Solar Activity Effects in the Thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2019. — Vol. 124, no. 12. — P. 10645–10658. — DOI: [10.1029/2019ja027392](https://doi.org/10.1029/2019ja027392).
- Koval A. V., Gavrilov N. M., Pogoreltsev A. I., et al. Dynamical Impacts of Stratospheric QBO on the Global Circulation up to the Lower Thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2022b. — Vol. 127, no. 4. — DOI: [10.1029/2021jd036095](https://doi.org/10.1029/2021jd036095).
- Kumar V., Yoden S., Hitchman M. H. QBO and ENSO Effects on the Mean Meridional Circulation, Polar Vortex, Subtropical Westerly Jets, and Wave Patterns During Boreal Winter // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2022. — Vol. 127, no. 15. — DOI: [10.1029/2022jd036691](https://doi.org/10.1029/2022jd036691).
- Laštovička J. Forcing of the ionosphere by waves from below // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2006. — Vol. 68, no. 3–5. — P. 479–497. — DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.018).
- Lilienthal F., Jacobi C. Nonlinear forcing mechanisms of the migrating terdiurnal solar tide and their impact on the zonal mean circulation // *Annales Geophysicae*. — 2019. — Vol. 37, no. 5. — P. 943–953. — DOI: [10.5194/angeo-37-943-2019](https://doi.org/10.5194/angeo-37-943-2019).
- Lilienthal F., Jacobi C., Geißler C. Forcing mechanisms of the terdiurnal tide // *Atmospheric Chemistry and Physics*. — 2018. — Vol. 18, no. 21. — P. 15725–15742. — DOI: [10.5194/acp-18-15725-2018](https://doi.org/10.5194/acp-18-15725-2018).
- Limpasuvan V., Orsolini Y. J., Chandran A., et al. On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. — 2016. — Vol. 121, no. 9. — P. 4518–4537. — DOI: [10.1002/2015jd024401](https://doi.org/10.1002/2015jd024401).
- Ma Xuan, Wang L., Smith D., et al. ENSO and QBO modulation of the relationship between Arctic sea ice loss and Eurasian winter climate // *Environmental Research Letters*. — 2022. — Vol. 17, no. 12. — DOI: [10.1088/1748-9326/aca4e9](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca4e9).
- Manson A., Meek C., Teitelbaum H., et al. Climatologies of semi-diurnal and diurnal tides in the middle atmosphere (70–110 km) at middle latitudes (40–55°) // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. — 1989. — Vol. 51, no. 7/8. — P. 579–593. — DOI: [10.1016/0021-9169\(89\)90056-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(89)90056-1).
- Medvedeva I. V., Semenov A. I., Pogoreltsev A. I., et al. Influence of sudden stratospheric warming on the mesosphere/lower thermosphere from the hydroxyl emission observations and numerical simulations // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2019. — Vol. 187. — P. 22–32. — DOI: [10.1016/j.jastp.2019.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.02.005).
- Nath D., Chen W., Zelin C., et al. Dynamics of 2013 Sudden Stratospheric Warming event and its impact on cold weather over Eurasia: Role of planetary wave reflection // *Scientific Reports*. — 2016. — Vol. 6, no. 1. — DOI: [10.1038/srep24174](https://doi.org/10.1038/srep24174).
- Pancheva D., Mitchell N., Hagan M., et al. Global-scale tidal structure in the mesosphere and lower thermosphere during the PSMOS campaign of June–August 1999 and comparisons with the global-scale wave model // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2002. — Vol. 64, no. 8–11. — P. 1011–1035. — DOI: [10.1016/s1364-6826\(02\)00054-8](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(02)00054-8).
- Pancheva D., Mukhtarov P., Hall C., et al. Climatology of the main (24-h and 12-h) tides observed by meteor radars at Svalbard and Tromsø: Comparison with the models CMAM-DAS and WACCM-X // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2020. — Vol. 207. — P. 105339. — DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105339](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105339).
- Pedatella N. M., Forbes J. M. Evidence for stratosphere sudden warming-ionosphere coupling due to vertically propagating tides // *Geophysical Research Letters*. — 2010. — Vol. 37, no. 11. — DOI: [10.1029/2010gl043560](https://doi.org/10.1029/2010gl043560).
- Pedatella N. M., Liu H.-L. The influence of atmospheric tide and planetary wave variability during sudden stratosphere warmings on the low latitude ionosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2013. — Vol. 118, no. 8. — P. 5333–5347. — DOI: [10.1002/jgra.50492](https://doi.org/10.1002/jgra.50492).

- Pedatella N. M., Richmond A. D., Maute A., et al. Impact of semidiurnal tidal variability during SSWs on the mean state of the ionosphere and thermosphere // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2016. — Vol. 121, no. 8. — P. 8077–8088. — DOI: [10.1002/2016ja022910](https://doi.org/10.1002/2016ja022910).
- Pogoreltsev A. I., Vlasov A. A., Fröhlich K., et al. Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2007. — Vol. 69, no. 17/18. — P. 2083–2101. — DOI: [10.1016/j.jastp.2007.05.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.05.014).
- Salminen A., Asikainen T., Maliniemi V., et al. Dependence of Sudden Stratospheric Warmings on Internal and External Drivers // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47, no. 5. — DOI: [10.1029/2019GL086444](https://doi.org/10.1029/2019GL086444).
- Siddiqui T. A., Chau J. L., Stolle C., et al. Migrating solar diurnal tidal variability during Northern and Southern Hemisphere Sudden Stratospheric Warmings // *Earth, Planets and Space*. — 2022. — Vol. 74, no. 1. — DOI: [10.1186/s40623-022-01661-y](https://doi.org/10.1186/s40623-022-01661-y).
- Smith A. K. Global Dynamics of the MLT // *Surveys in Geophysics*. — 2012. — Vol. 33, no. 6. — P. 1177–1230. — DOI: [10.1007/s10712-012-9196-9](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9196-9).
- Sridharan S., Sathishkumar S., Gurubaran S. Variabilities of mesospheric tides during sudden stratospheric warming events of 2006 and 2009 and their relationship with ozone and water vapour // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2012. — Vol. 78/79. — P. 108–115. — DOI: [10.1016/j.jastp.2011.03.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.013).
- Sun L., Robinson W. A. Downward influence of stratospheric final warming events in an idealized model // *Geophysical Research Letters*. — 2009. — Vol. 36, no. 3. — DOI: [10.1029/2008gl036624](https://doi.org/10.1029/2008gl036624).
- Suvorova E. V., Pogoreltsev A. I. Modeling of nonmigrating tides in the middle atmosphere // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2011. — Vol. 51, no. 1. — P. 105–115. — DOI: [10.1134/s0016793210061039](https://doi.org/10.1134/s0016793210061039).
- Trenberth K. E. The Definition of El Niño // *Bulletin of the American Meteorological Society*. — 1997. — Vol. 78, no. 12. — P. 2771–2777. — DOI: [10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:tdoen>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:tdoen>2.0.co;2).
- Vargin P. N., Kolennikova M. A., Kostykin S. V., et al. Impact of Sea Surface Temperature Anomalies in the Equatorial and North Pacific on the Arctic Stratosphere According to the INMCM5 Climate Model Simulations // *Russian Meteorology and Hydrology*. — 2021. — Vol. 46, no. 1. — P. 1–9. — DOI: [10.3103/s1068373921010015](https://doi.org/10.3103/s1068373921010015).
- Wallace J. M., Panetta R. L., Estberg J. Representation of the Equatorial Stratospheric Quasi-Biennial Oscillation in EOF Phase Space // *Journal of the Atmospheric Sciences*. — 1993. — Vol. 50, no. 12. — P. 1751–1762. — DOI: [10.1175/1520-0469\(1993\)050<1751:rotesq>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<1751:rotesq>2.0.co;2).
- Wang C., Deser C., Yu J.-Y., et al. El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review // *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*. — Springer Netherlands, 2016. — P. 85–106. — DOI: [10.1007/978-94-017-7499-4_4](https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_4).
- Wolter K., Timlin M. S. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext) // *International Journal of Climatology*. — 2011. — Vol. 31, no. 7. — P. 1074–1087. — DOI: [10.1002/joc.2336](https://doi.org/10.1002/joc.2336).
- Xu J., Smith A. K., Jiang G., et al. Features of the seasonal variation of the semidiurnal, terdiurnal and 6-h components of ozone heating evaluated from Aura/MLS observations // *Annales Geophysicae*. — 2012. — Vol. 30, no. 2. — P. 259–281. — DOI: [10.5194/angeo-30-259-2012](https://doi.org/10.5194/angeo-30-259-2012).