

Взаимосвязь Эль-Ниньо — Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов глобальной атмосферной осцилляции*

И. В. Серых, Д. М. Сонечкин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Российская Федерация, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36

Для цитирования: Серых, И. В., Сонечкин, Д. М. (2022). Взаимосвязь Эль-Ниньо — Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов глобальной атмосферной осцилляции. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (4), 614–630.
<https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>

По среднемесячным данным NCEP/NCAR Reanalysis с помощью специально разработанной методики исследована межгодовая изменчивость полей аномалий атмосферного давления на уровне моря, ассоциированная с глобальной атмосферной осцилляцией за период с 1950 по 2021 г. Рассчитано поле средних отклонений аномалий давления при Эль-Ниньо — Южном колебании от межгодовой изменчивости глобальной атмосферной осцилляции. Показано, что изменчивость аномалий давления при глобальной атмосферной осцилляции содержит, помимо моды, связанной с Эль-Ниньо — Южным колебанием, еще и моду межгодовой климатической изменчивости, связанную с Антарктическим колебанием, — Южную кольцевую моду. Обнаружено, что глобальная атмосферная осцилляция не включает в себя часть изменчивости аномалий давления, ассоциированную с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья центрально-тихоокеанского типа. Во всех остальных узлах сетки поле средних отклонений аномалий давления при Эль-Ниньо — Южном колебании от глобальной атмосферной осцилляции имеет разности давления, слабо отличающиеся от нуля и формально статистически незначимые. Это означает, что в межгодовой климатической изменчивости атмосферного давления на уровне моря, ассоциированной с глобальной атмосферной осцилляцией, существуют только две моды: Эль-Ниньо — Южное колебание и Южная кольцевая мода. С помощью кросс-вейвлетного анализа исследованы связи между индексами Эль-Ниньо — Южного колебания и Южной кольцевой моды. Найдены отрицательные связи между этими индексами на периодах колебаний около 11 лет. Анализ этих индексов и временного ряда общего солнечного излучения позволил выдвинуть гипотезу о влиянии синхронизации и рассинхронизации квазиодиннадцатилетних изменений солнечной активности и Эль-Ниньо — Южного колебания на ослабление и усиление отрицательных связей между Эль-Ниньо — Южным колебанием и Южной кольцевой модой на периодах колебаний около 11 лет.

Ключевые слова: Эль-Ниньо — Южное колебание, Антарктическое колебание, Южная кольцевая мода, глобальная атмосферная осцилляция, 11-летнее изменение солнечной активности.

* Исследование выполнено в рамках государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2021-0003 «Крупномасштабные, волновые и вихревые океанские процессы и роль океана в формировании климата: междекадная эволюция циркуляции, гидрофизических полей океана и потоков на границе океан — атмосфера в условиях меняющегося климата».

1. Введение

При нейтральном состоянии тропиков Тихого океана пассатные ветры смещают теплую воду к берегам Индонезийского архипелага, где образуется зона конвекции, и влажный воздух поднимается в верхние слои тропосферы. Это сопровождается повышением уровня океана и заглублением термоклина. При Эль-Ниньо пассатные ветры ослабевают, теплая вода и зона конвекции смещаются в центр Тихого океана, что приводит к изменению давления и циркуляции атмосферы. В западной части приэкваториальной зоны Тихого океана происходит поднятие термоклина и снижается уровень моря, а у берегов Южной Америки наблюдаются ослабление апвеллинга и заглубление термоклина. Весь этот процесс является следствием взаимодействия между океаном и атмосферой и в совокупности называется Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) (Bjerknes, 1969; Wyrтки, 1975; Cane and Zebiak, 1985).

В работах (Byshev et al., 2014; Serykh et al., 2019; Serykh and Sonechkin, 2020; Serykh and Sonechkin, 2021a) показано, что ЭНЮК является элементом глобальной атмосферной осцилляции (ГАО). На ГАО оказывают влияние следующие внешние квазипериодические силы: годовой ход поступления тепла от Солнца; чандлеровское колебание полюсов Земли, период действия которого составляет около 14 месяцев; 11-летнее изменение солнечной активности; лунно-солнечная нутация оси вращения Земли, имеющая период в 18.6 лет (Serykh and Sonechkin, 2019). Из-за несоизмеримости периодов воздействия этих внешних сил есть основания полагать, что динамика ГАО не является хаотической, а может быть описана математической моделью странного нехаотического аттрактора (СНА) (Serykh and Sonechkin, 2019). То есть динамику ГАО можно прогнозировать статистическими методами. Благодаря этому и западно-восточному распространению пространственной структуры ГАО предложен индекс-предиктор ЭНЮК, позволяющий прогнозировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с годовой заблаговременностью (Vakulenko et al., 2018; Serykh and Sonechkin, 2021b).

Поскольку пространственная структура ГАО охватывает не только тропики, но и средние и высокие широты, можно предположить, что ГАО включает в себя не только ЭНЮК, но и другие известные моды межгодовой климатической изменчивости, например Южную кольцевую моду (ЮКМ), связанную с Антарктическим колебанием (ААК) (Wallace and Thompson, 2002). ЮКМ представляет собой низкочастотную моду атмосферной изменчивости Южного полушария, которая определяется как широтное смещение пояса западных ветров и низкого атмосферного давления, окружающих Антарктиду (Lee et al., 2019). При положительной фазе ЮКМ пояс западных ветров, который движет Антарктическим циркумполярным течением (АЦТ), усиливается и смещается в сторону Антарктиды, а при положительной фазе — в сторону экватора (Thompson et al., 2011).

Существует связь между ЭНЮК и аномалиями температуры поверхности океана (ТПО) в южной части Тихого океана и Южной Атлантике (Hsu et al., 2018), которая проявляется и сохраняется в течение 3–4 сезонов после событий Эль-Ниньо и влияет на морской лед в этом регионе (Yuan, 2004). В годы Эль-Ниньо наблюдается потепление в восточной части моря Росса и похолодание в его западной части, в годы же Ла-Нинья наблюдаются обратные явления (Bertler et al., 2006). ТПО Южного океана в значительной степени пространственно коррелируют как с ААК, так

и с Южным колебанием (ЮК) (Ferster et al., 2018). Эль-Ниньо (Ла-Нинья) обычно соответствует отрицательной (положительной) фазе ААК (Pohl et al., 2010). Благодаря этому учет состояния тропиков Тихого океана помогает улучшить в динамических моделях прогнозируемость ААК и связанной с ним ЮКМ (Lim et al., 2013).

Эль-Ниньо вносит вклад в отрицательную фазу ЮКМ, однако эта взаимосвязь претерпевает междесятилетние изменения в зависимости от интенсивности (Wang and Cai, 2013) и пространственной структуры ЭНЮК (Yeo and Kim, 2015). Например, отмечено усиление совместной изменчивости ЭНЮК и ААК после середины 1990-х годов по сравнению с 1979–1993 гг. (Han et al., 2017). Дополнительно существует связь между ЮКМ и атмосферной изменчивостью в тропиках, не зависящей от ЭНЮК (Ding et al., 2014). Серии экспериментов с моделью общей циркуляции подтвердили связи ЭНЮК и ЮКМ, но показали асимметричное влияние событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья на субполярный струйный поток (Kim et al., 2017). Таким образом, связи между ЭНЮК и ЮКМ можно назвать достаточно сложными и нестационарными.

Вследствие ЭНЮК возникают возмущения ветра, которые вызывают цепочку атмосферных планетных волн, исходящую от аномального источника тепла в тропиках Тихого океана (Guan et al., 2014). Связанные с Эль-Ниньо аномальное нагревание и восходящие потоки тепла в центрально-восточной экваториальной части Тихого океана могут привести к дивергенции верхних слоев тропосферы в западной и центральной частях Тихого океана. Эта дивергенция верхней тропосферы играет важную роль в связи экваториальных аномалий тепла с изменением субтропических западных атмосферных струйных потоков обоих полушарий и, следовательно, приводит к усилению меридиональной циркуляции, оказывающей влияние на ААК (Li et al., 2015). Также ЭНЮК вызывает межгодовую изменчивость климата на западе Антарктики за счет изменения атмосферной циркуляции в регионе моря Амундсена (Yiu and Mauck, 2020).

Реконструкции на основе прокси-данных и моделирование климата показывают, что индексы ЭНЮК и ЮКМ в основном отрицательно коррелировали за последнее тысячелетие (Dätwyler et al., 2020). При этом реконструкции температуры демонстрируют значительное увеличение климатической изменчивости в Южном океане с 1940-х годов (Turney et al., 2017). Климатический реанализ и моделирование показывают, что изменение температуры поверхности тропического Тихого океана порождает цепочку атмосферных волн Россби, которые распространяются по большей части Южного полушария в течение южной весны и лета. Записи антарктических ледяных кернов также демонстрируют наличие сигнала ЭНЮК, подтверждая его влияние на высокие широты Южного полушария (Crockart et al., 2021).

Существует и обратное влияние ЮКМ на ЭНЮК. Фаза ЮКМ в декабре — феврале также может влиять на амплитуду ЭНЮК в течение последующих марта — мая (Zheng et al., 2017). Изменчивость ветра и атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) над АЦТ вместе с эффектами топографии и береговой линии существенно влияет на развитие событий ЭНЮК (Stepanov, 2019). Во время переходов ЮК и ААК из одной своей фазы в другую чередующиеся антициклонические и циклонические центры аномалий ДУМ распространяются из западной части Тихого океана в его восточную часть (Peng et al., 2014). Также перемещаются на восток

и аномалии зонального ветра, расположенные между этими центрами аномалий ДУМ, способствуя тем самым переносу аномалий ТПО из западной части Тихого океана в его восточную часть. Когда антициклонические аномалии ДУМ достигают восточной части Тихого океана, то устанавливается положительная фаза ЮК (Ла-Нинья), и наоборот.

Результаты моделирования из Проекта взаимного сравнения совместных моделей СМIP3 показывают, что сигналы ЭНЮК существенно проецируются на ЮКМ, и эти сигналы имеют тенденцию достигать пика раньше самой кульминации событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья (Cai et al., 2011). К сожалению, недостаток инструментальных наблюдений в регионе Южного океана ограничивает возможности в исследовании связей ЭНЮК и ЮКМ. Тем не менее актуальность таких исследований возрастает, поскольку активность ЭНЮК и его влияние на температуру в Антарктике усиливаются в ответ на усиление радиационного воздействия парниковых газов (Rahaman et al., 2019).

Данная работа посвящена поиску ответа на вопрос: существует ли в межгодовой климатической изменчивости, ассоциированной с ГАО, только одна мода, которой является ЭНЮК, или же ГАО включает в себя и другие моды, одной из которых может являться ЮКМ.

2. Данные и методы

Использованы среднемесячные данные атмосферного давления на уровне моря из NCEP/NCAR Reanalysis на сетке $2.5 \times 2.5^\circ$ за период с 1950 по 2021 г. (Kalnay et al., 1996). В каждом узле сетки вычислялся средний годовой ход, который затем вычитался из исходных данных для получения аномалий по отношению к годовому ходу.

Нормализация временных рядов производилась на их стандартные отклонения. Для полосовой фильтрации использовался фильтр Баттерворта. Применялось кросс-вейвлетное преобразование временных рядов с использованием вейвлет-функции Морле (Torrence and Compo, 1998). Порядок вейвлета Морле выбран равным 6.2035, чтобы вейвлет-масштаб был точно равен обычному временному масштабу Фурье. Для оценки, зависящей от календарного времени и периодов колебаний, синхронности взаимных вариаций двух индексов, были вычислены произведения их вещественных вейвлет-компонентов. Соответствующий метод кросс-вейвлетного преобразования был впервые предложен в (Vakulenko et al., 2004). На наш взгляд, его выходной результат легче анализировать, чем результат более известного метода кросс-вейвлетного преобразования, описанного в (Torrence and Webster, 1999).

Использован океанический индекс Эль-Ниньо (Oceanic Niño Index — ONI) за 1950–2021 гг., который был взят без изменений с сайта Центра прогнозирования климата (NOAA Climate Prediction Centre) (src.ncep.noaa.gov, 2022). ONI представляет собой скользящее трехмесячное среднее средних аномалий ТПО по данным ERSST.v5 (Huang et al., 2017) в районе Niño 3.4 (5° с.ш. — 5° ю.ш., 120° – 170° з.д.) относительно центрированных 30-летних базовых периодов, обновляемых каждые 5 лет.

Индекс ЮКМ вычислен как разность средних зональных аномалий ДУМ между 40° ю.ш. и 65° ю.ш. (Gong and Wang, 1999) с последующим удалением линейного

тренда, вычисленного методом наименьших квадратов. Дополнительно использован индекс ЮКМ, рассчитанный на основе наблюдений (Marshall, 2003) за 1957–2020 гг. и взятый с сайта Британской антарктической службы (British Antarctic Survey) (Bas.ac.uk, 2022).

Использованы ежемесячные усредненные климатические данные общего солнечного излучения (total solar irradiance — TSI) с 1882 г. по настоящее время, построенные с использованием модели солнечной изменчивости NRLTSI2 (Coddington et al., 2016) и взятые с сайта Интерактивного центра данных солнечного излучения (LASP Interactive Solar Irradiance Data Center) (Lasp.colorado.edu, 2022).

3. Результаты

В первую очередь было необходимо выяснить: существует ли в межгодовой климатической изменчивости ДУМ, ассоциированной с ГАО, только одна мода — Эль-Ниньо — Южное колебание, а поля остальных компонент представляют собой только наблюдательные и мелкомасштабные погодные шумы. Или же ГАО включает в себя и другие моды межгодовой климатической изменчивости ДУМ. Для выяснения этого была разработана специальная методика и выполнены следующие вычисления.

Пусть $G(\varphi, \lambda)$ есть поле ГАО давления на уровне моря (ГАО ДУМ), заданное во всех узлах регулярной сетки (рис. 1), покрывающей всю Землю. Оно рассчитывается по индексу GAO1, который является комбинацией центрированных и нормированных рядов средних аномалий ДУМ (относительно годового хода) в 10 очагах барического поля ГАО: (5° ю.ш. — 5° с.ш., 35° – 25° з.д.) + (5° ю.ш. — 5° с.ш., 55° – 65° в.д.) + (5° ю.ш. — 5° с.ш., 145° – 155° в.д.) + (55° – 65° с.ш., 95° – 85° з.д.) + (65° – 55° ю.ш., 95° – 85° з.д.) — (45° – 55° с.ш., 175° – 165° з.д.) — (45° – 55° с.ш., 15° – 5° з.д.) — (55° – 45° ю.ш., 15° – 5° з.д.) — (55° – 45° ю.ш., 175° – 165° з.д.) — (5° ю.ш. — 5° с.ш., 95° – 85° з.д.) (Serykh et al., 2019). На рис. 1, б оранжевыми квадратами обозначены районы, входящие в индекс GAO1 со знаком плюс, голубыми квадратами — со знаком минус.

После расчета ряд GAO1 фильтруется скользящим средним с окном 3 месяца, центрируется и нормируется, то есть его среднее равно нулю, а дисперсия — единице. Поле ГАО ДУМ является разностью между средними полями положительной и отрицательной фазами ГАО, которые отбираются по значениям индекса GAO1 превосходящим +0.5 или меньшим –0.5, то есть по критерию половины среднего квадратичного отклонения (ряд центрирован и нормирован), на протяжении не менее 5 месяцев.

Пусть $G_{EL}(\varphi, \lambda, t)$ и $G_{LA}(\varphi, \lambda, t)$ есть средние поля аномалий ДУМ в конкретном t -ом событии Эль-Ниньо или Ла-Нинья, также заданные на этой сетке. Они подсчитываются по ONI. При Эль-Ниньо значение ONI должно превосходить $+0.5^\circ$ С на протяжении 5 месяцев или более, при Ла-Нинья — быть меньше чем -0.5° С. На рис. 2 представлено поле разности между средним для всех полей $G_{EL}(\varphi, \lambda, t)$ и средним для всех полей $G_{LA}(\varphi, \lambda, t)$ за 1950–2021 гг. Назовем это поле разности между средним Эль-Ниньо и средним Ла-Нинья полем ЭНЮК ДУМ. Поля ГАО ДУМ (рис. 1) и ЭНЮК ДУМ (рис. 2) имеют между собой большое сходство во всем тропическом поясе, а также в средних широтах Тихого и Атлантического океанов. Тем не менее между ними существуют и различия, особенно сильно проявляющи-

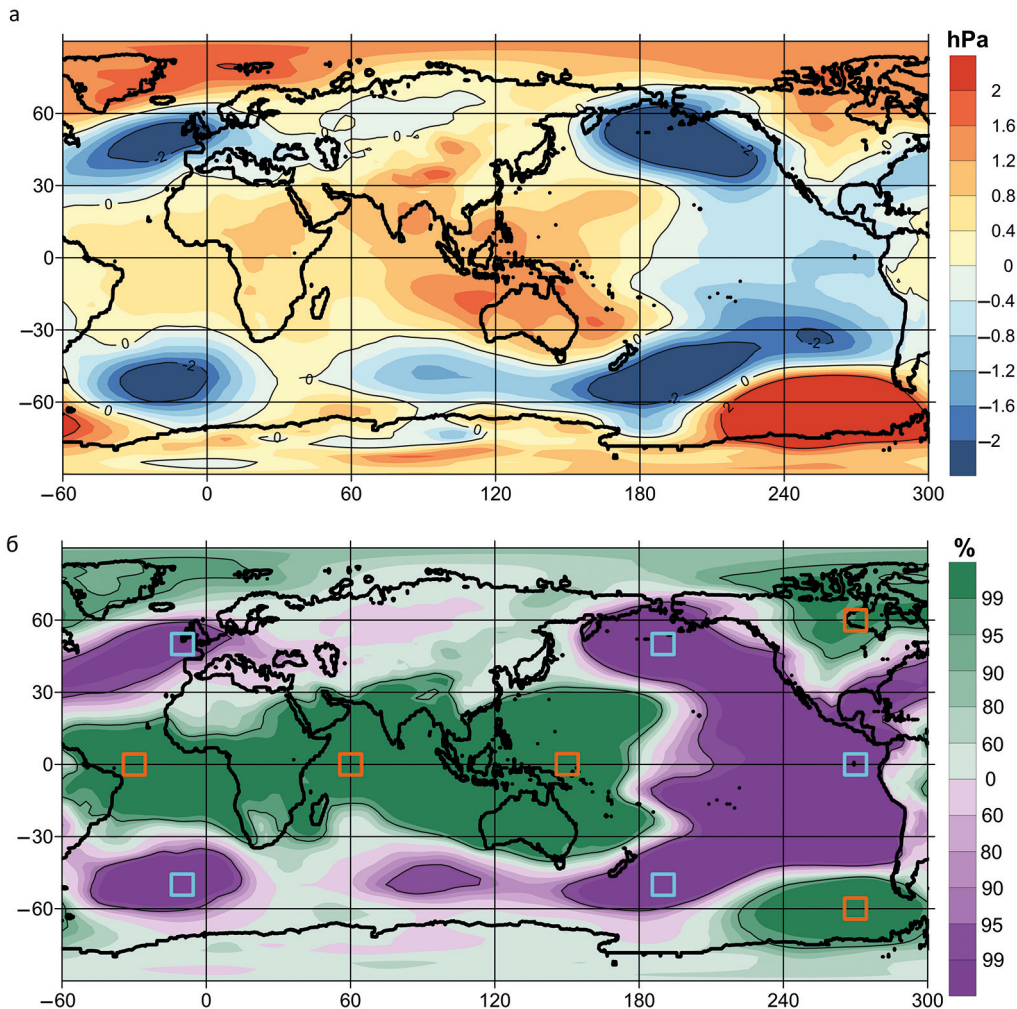


Рис. 1. Поле разности средних аномалий атмосферного давления на уровне моря между противоположными фазами ГАО по индексу GAO1 (с неудаленным линейным трендом) за 1950–2021 гг. (а). Поле значений вероятности для (а) по t -критерию Стьюдента (б), зеленый и фиолетовый цвета соответствуют значимости положительных и отрицательных отклонений ДУМ. Оранжевыми квадратами обозначены районы, входящие в индекс GAO1 со знаком плюс, голубыми квадратами — со знаком минус. В качестве исходной информации использованы среднемесячные данные ДУМ из NCEP/NCAR Reanalysis

еся в средних широтах южной части Индийского океана и средних широтах Евразии. При этом в высоких широтах поля ГАО ДУМ и ЭНЮК ДУМ опять становятся довольно схожими, если принимать во внимание малое количество данных наблюдений, особенно в Южном океане и Антарктиде.

Определим, есть ли в поле ГАО ДУМ вклад других мод межгодовой климатической изменчивости, отличных от ЭНЮК. Для этого при оценке поля ГАО ДУМ как главной моды межгодовых климатических вариаций прежде всего нормализуем это поле, для чего подсчитаем сумму квадратов значений поля ГАО ДУМ во

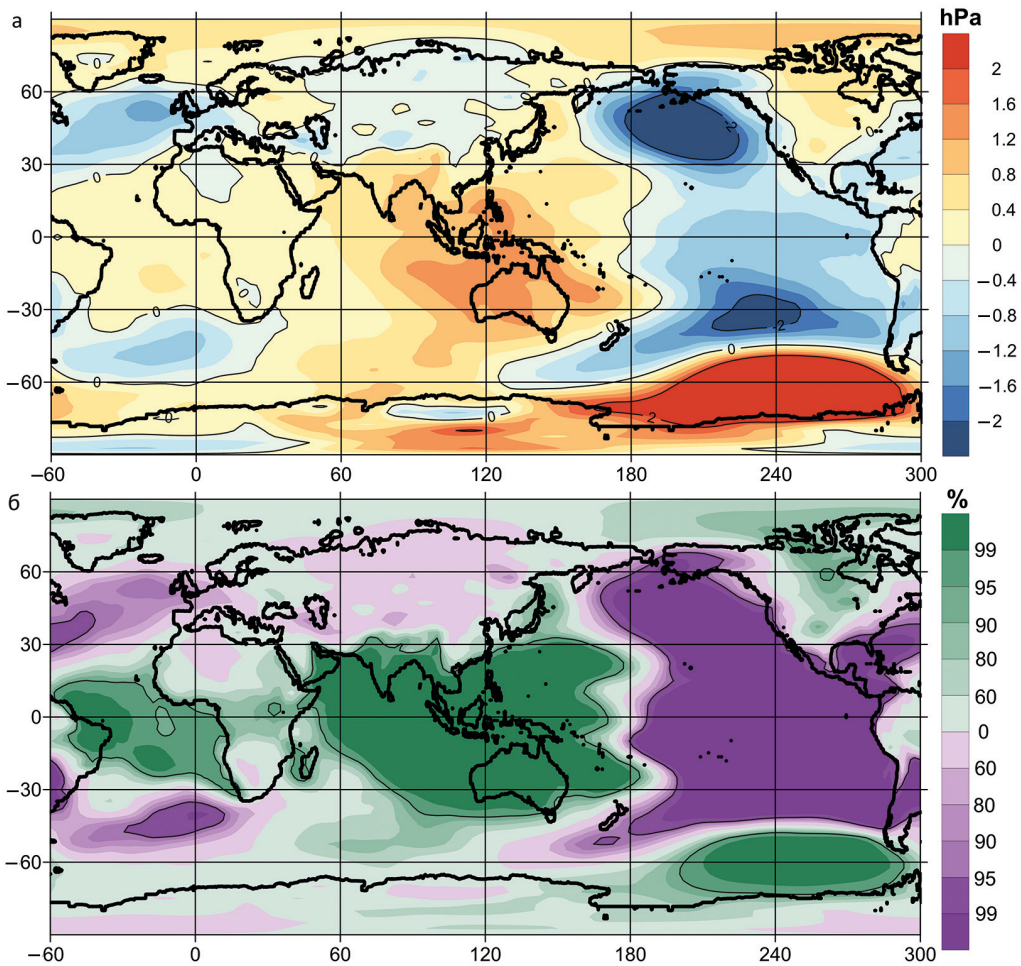


Рис. 2. Поле разности средних аномалий атмосферного ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК по индексу ONI за 1950–2021 гг., взятому без изменений с сайта NOAA Climate Prediction Center (а). Поле значений вероятности для (а) по t -критерию Стьюдента (б), зеленый и фиолетовый цвета соответствуют значимости положительных и отрицательных отклонений ДУМ. В качестве исходной информации использованы среднемесячные данные ДУМ из NCEP/NCAR Reanalysis

всех узлах выбранной регулярной сетки и затем поделим значение в каждом узле на корень квадратный из полученной суммы. Получившееся нормированное поле и будем далее обозначать $G(\varphi, \lambda)$. Выполним далее следующие действия.

1. Вычислим коэффициенты разложения по $G(\varphi, \lambda)$ для всех событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья по формулам

$$K_{EL}(t) = \sum_{\varphi} \sum_{\lambda} G_{EL}(\varphi, \lambda, t) \cdot G(\varphi, \lambda),$$

где $t = 1, 2, \dots, N(EL)$ — события Эль-Ниньо;

$$K_{LA}(t) = \sum_{\varphi} \sum_{\lambda} G_{LA}(\varphi, \lambda, t) \cdot (-G(\varphi, \lambda)),$$

где $t = 1, 2, \dots, N(LA)$ — события Ла-Нинья.

2. Вычислим вклады ГАО во все события Эль-Ниньо и Ла-Нинья по формулам

$$\hat{G}_{EL}(\varphi, \lambda, t) = K_{EL}(t) \cdot G(\varphi, \lambda),$$
$$\hat{G}_{LA}(\varphi, \lambda, t) = K_{LA}(t) \cdot (-G(\varphi, \lambda)).$$

3. Вычислим отклонения всех исходных полей $G_{EL}(\varphi, \lambda, t)$ и $G_{LA}(\varphi, \lambda, t)$ от соответствующих им вкладов $\hat{G}_{EL}(\varphi, \lambda, t)$ и $\hat{G}_{LA}(\varphi, \lambda, t)$ по формулам:

$$X_{EL}(\varphi, \lambda, t) = G_{EL}(\varphi, \lambda, t) - \hat{G}_{EL}(\varphi, \lambda, t),$$
$$X_{LA}(\varphi, \lambda, t) = G_{LA}(\varphi, \lambda, t) - \hat{G}_{LA}(\varphi, \lambda, t).$$

4. Вычислим разность между средними значениями полученных полей отклонений $X_{EL}(\varphi, \lambda, t)$ и $X_{LA}(\varphi, \lambda, t)$ для всех $t=1, 2, \dots, N(EL)$ и всех $t=1, 2, \dots, N(LA)$, для того чтобы подсчитать поле средних отклонений разностей между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья по индексу ONI от поля ГАО (рис. 3, а). Оценим статистическую значимость этих значений средних отклонений по t -критерию Стьюдента (рис. 3, б).

Поле средних отклонений ЭНЮК от ГАО (рис. 3) имеет разности ДУМ в большинстве узлов сетки, слабо отличающиеся от нуля и формально статистически незначимые. Исключение составляют отрицательные аномалии ДУМ в центре экваториальной области Тихого океана, в которую смещается при Эль-Ниньо зона планетарной конвекции и в которой наблюдаются наиболее сильные аномалии ТПО при событиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья центрально-тихоокеанского типа (ЦТ). Таким образом, можно сделать заключение, что ассоциированная с ГАО межгодовая климатическая изменчивость ДУМ не включает в себя полностью всю изменчивость ЭНЮК, в особенности изменчивость, ассоциированную с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья ЦТ.

С другой стороны, обширные области статистически значимых положительных отклонений ДУМ наблюдаются в регионах на юге Тихого и Индийского океанов. Эти регионы характерны для ЮКМ, связанной с ААК (рис. 4). Южная кольцевая мода является ведущей модой атмосферной изменчивости в средних и высоких широтах Южного полушария (к югу от 20° ю.ш.). В этих же регионах наблюдаются существенные амплитуды колебаний аномалий ДУМ между противоположными фазами ГАО (см. рис. 1). Поле же ЭНЮК ДУМ содержит гораздо меньшие амплитуды колебаний в этих регионах, и они обладают при этом меньшей статистической значимостью (см. рис. 2).

Это означает, что в межгодовой климатической изменчивости ДУМ, ассоциированной с ГАО, существуют моды, связанные с ЭНЮК и ЮКМ. Все остальные же узлы полей $X_{EL}(\varphi, \lambda, t)$ и $X_{LA}(\varphi, \lambda, t)$ представляют собой только наблюдательные и мелкомасштабные погодные шумы (см. рис. 3).

Рассмотрим связи между ONI и индексом ЮКМ. На рис. 5, а представлена кросс-вейвлетная диаграмма этих индексов. Красным цветом на ней обозначены календарные временные интервалы, в которые наблюдалась синхронизация индексов ONI и ЮКМ на определенных периодах колебаний, а синим цветом — периоды их противофазных колебаний. Желтый и голубой цвета, а также чередование крас-

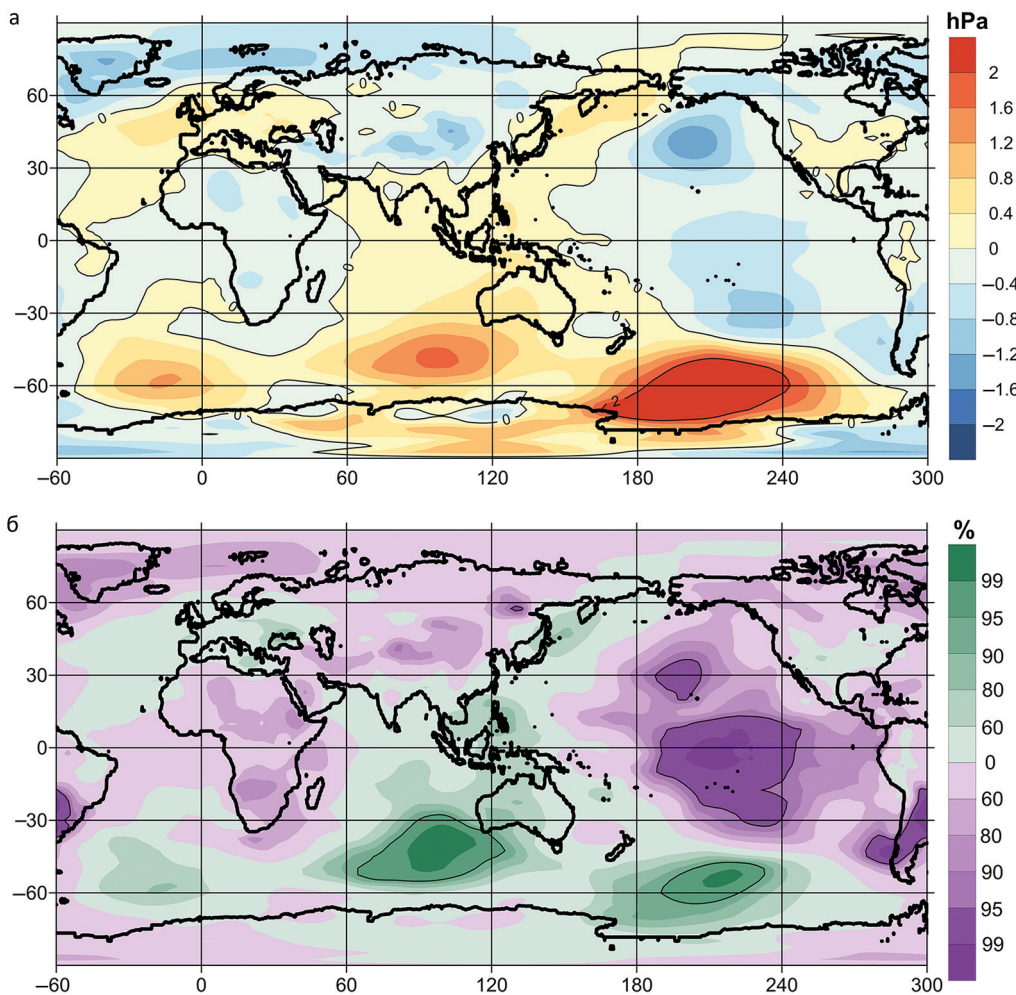


Рис. 3. Отклонения аномалий атмосферного ДУМ поля ЭНЮК, рассчитанного по индексу ONI, от поля ГАО, рассчитанного по индексу GAOI за 1950–2021 гг. (а). Поле значений вероятности для (а) по t -критерию Стьюдента (б), зеленый и фиолетовый цвета соответствуют значимости положительных и отрицательных отклонений ДУМ. В качестве исходной информации использованы среднемесячные данные ДУМ из NCEP/NCAR Reanalysis

ного и синего свидетельствуют о рассинхронизации индексов в эти календарные годы на этих периодах колебаний. Вследствие влияния краевых эффектов вейвлетов, обозначенных сиреневыми линиями и образующих части конуса, отсекающего по краям диаграммы половину соответствующего периода, к крайним значениям диаграммы следует относиться с осторожностью (Grinsted et al., 2004). Также необходимо отметить, что диаграмма, изображенная на рис. 5, а, демонстрирует не кросс-корреляции, а синхронность вариаций индексов ONI и ЮКМ, и поэтому ее шкала меняется не в диапазоне от -1 до $+1$, а в абстрактных единицах. На рис. 5, а видно, что на периодах от 1 года до 10 лет на протяжении всего исследуемого периода с 1950 по 2021 г. наблюдаются сложные, нестационарные и многомасштабные

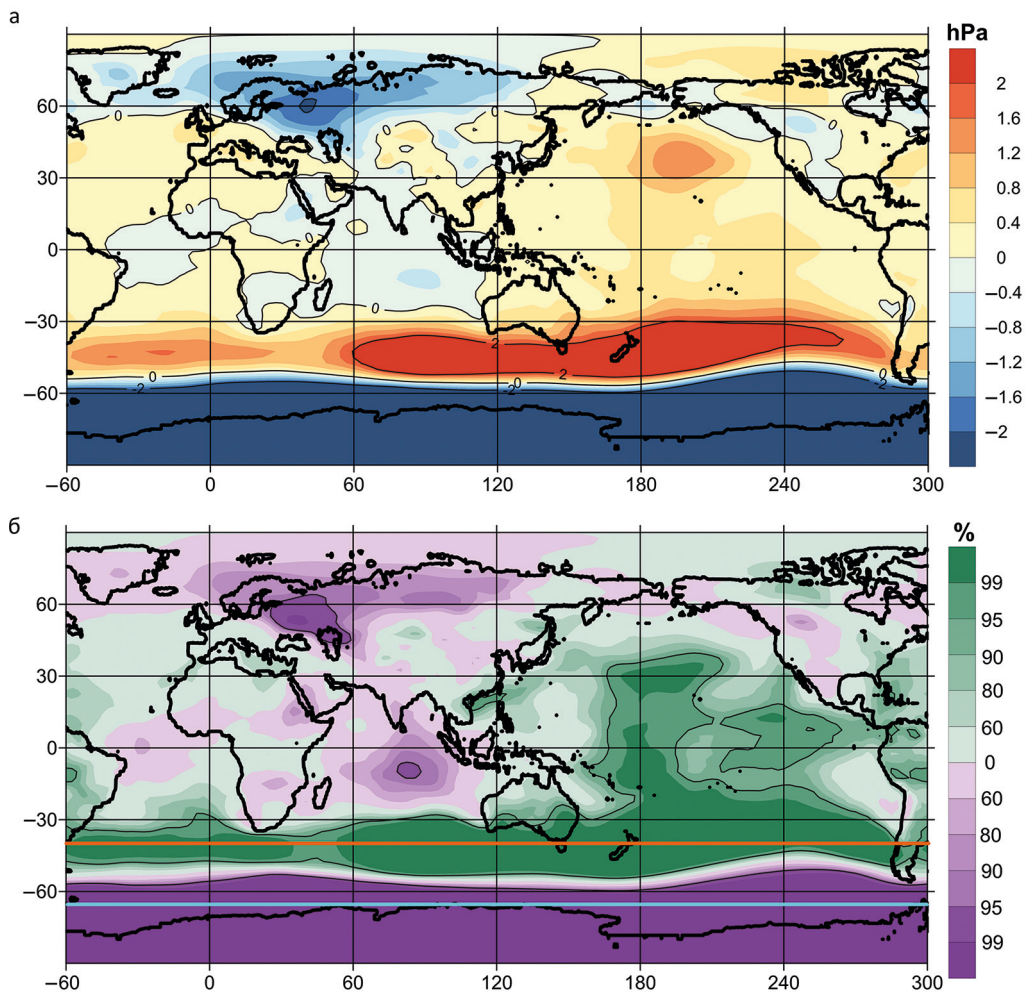


Рис. 4. Поле разности средних аномалий атмосферного ДУМ между противоположными фазами ЮКМ по индексу ЮКМ за 1950–2021 гг., вычисленному как разность средних зональных аномалий ДУМ между 40° ю.ш. (оранжевая линия) и 65° ю.ш. (голубая линия), с последующим удалением линейного тренда (а). Поле значений вероятности для (а) по t -критерию Стьюдента (б), зеленый и фиолетовый цвета соответствуют значимости положительных и отрицательных отклонений ДУМ. В качестве исходной информации использованы среднемесячные данные ДУМ из NCEP/NCAR Reanalysis

связи между индексами ONI и ЮКМ. На этих межгодовых периодах сложно выделить какие-либо закономерности в их связях между собой. Но на периодах от 10 до 20 лет дело обстоит иначе.

На периодах колебаний около 11 лет наблюдаются отрицательные связи между индексами ONI и ЮКМ. При этом можно приблизительно разделить календарные интервалы их усиления и ослабления. Для выделения квазиодиннадцатилетнего периода колебаний построены графики индексов ONI и ЮКМ с полосовой фильтрацией от 10 до 12 лет (рис. 5, 6). На этих графиках видны периоды синхронизации и рассинхронизации индексов ONI и ЮКМ на квазиодиннадцатилетнем периоде.

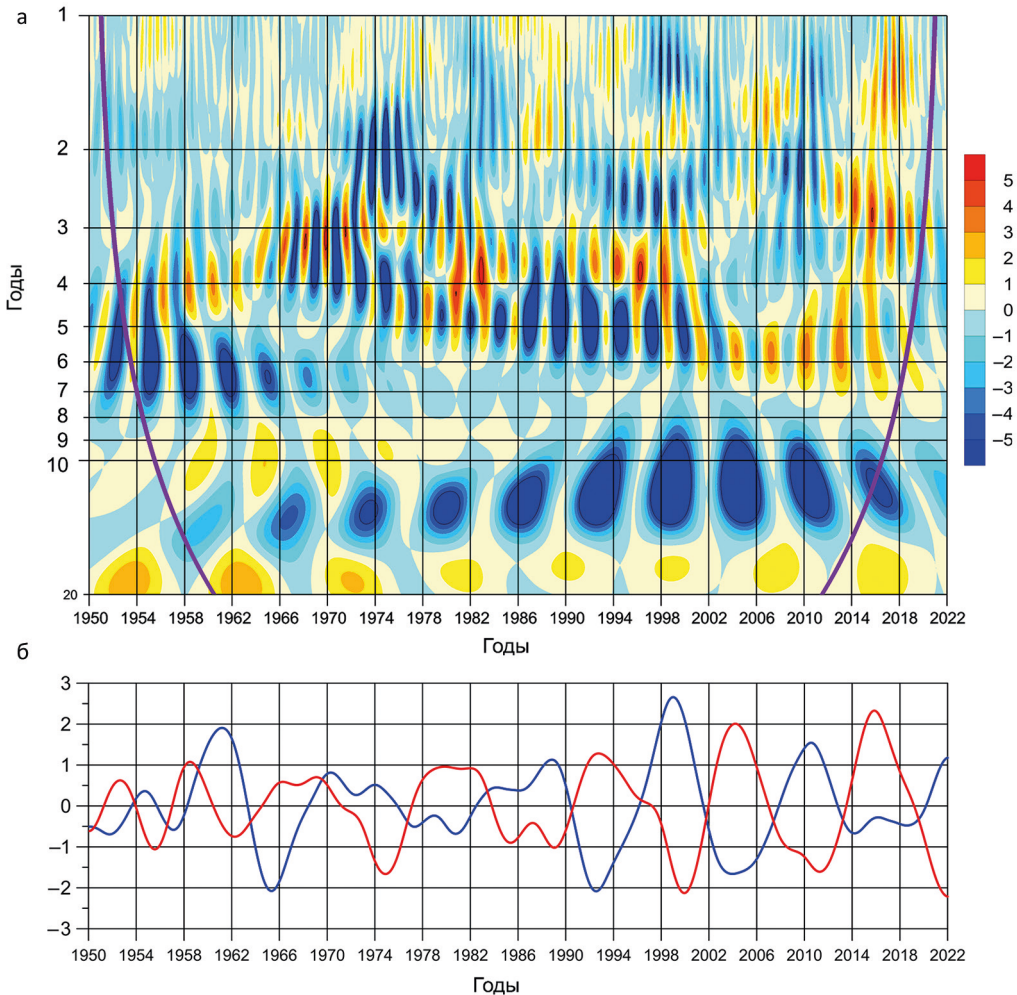


Рис. 5. Кросс-вейвлетная диаграмма синхронности вариаций ONI и индекса ЮКМ (а). Произведено предварительное центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения. Краевые эффекты вейвлетов показаны фиолетовыми линиями. Временные ряды ONI (красный) и индекса ЮКМ (синий) после применения полосового фильтра Баттлерворта от 10 до 12 лет (б)

Можно предположить, что этот период колебаний связан с квазиодиннадцатилетними изменениями солнечной активности.

На рис. 6 представлена кросс-вейвлетная диаграмма ONI и TSI, а также графики ONI и TSI с полосовой фильтрацией от 10 до 12 лет. Из анализа рис. 5 и 6 следует, что в период рассинхронизации TSI и ONI (с 1987 по 2014 г.) наблюдаются сильные отрицательные связи между индексами ONI и ЮКМ. В период же синхронизации TSI и ONI (с 1957 по 1986 г.) отрицательные связи между индексами ONI и ЮКМ были слабее. Следует принять во внимание, что для периода с 1950 по 1956 г. данных наблюдений в регионе ЮКМ существует очень мало, с чем и могут быть связаны слабые связи между индексами ONI и ЮКМ в этот временной интервал. Также нужно помнить о граничных эффектах, влияющих на результаты при построении

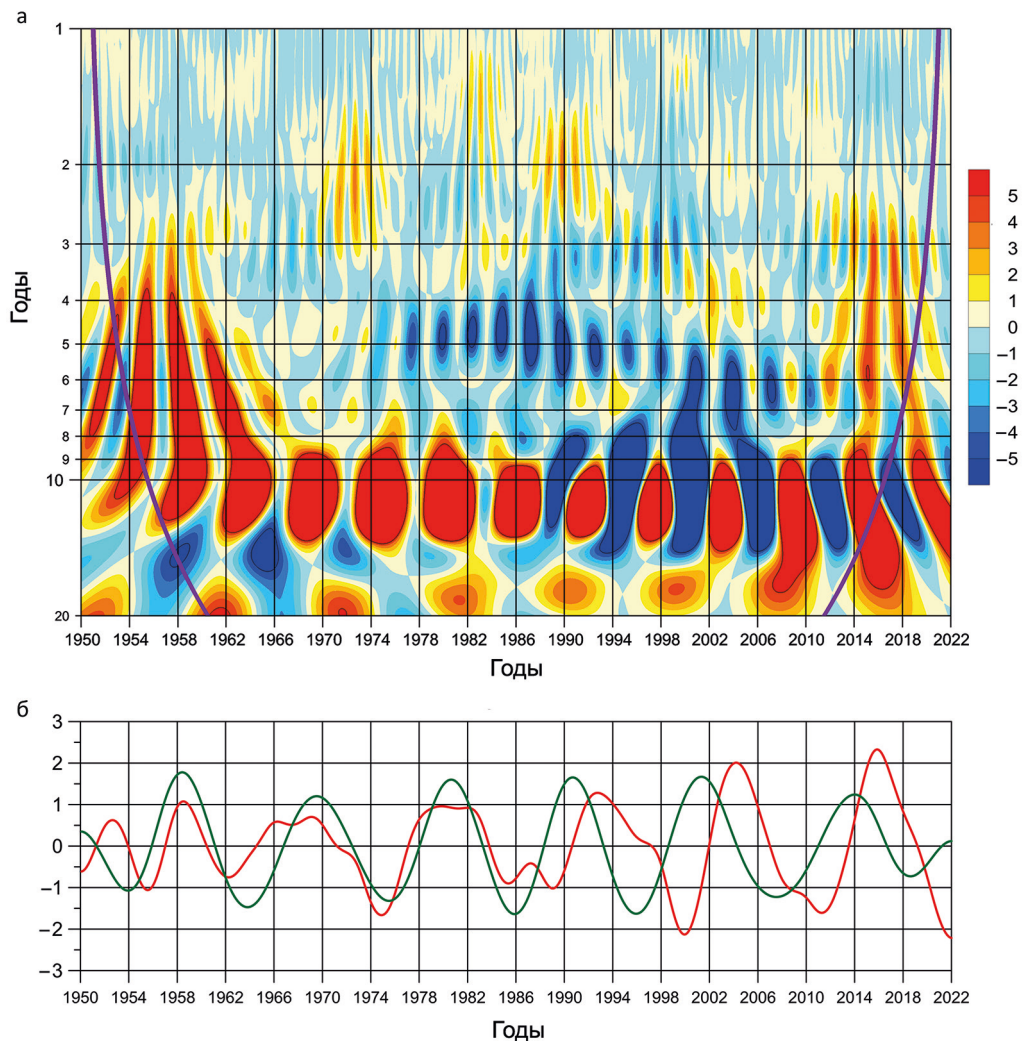


Рис. 6. Кросс-вейвлетная диаграмма синхронности вариаций ONI и временного ряда TSI (а). Произведено предварительное центрирование и нормирование рядов на их среднеквадратические отклонения. Краевые эффекты вейвлетов показаны фиолетовыми линиями. Временные ряды ONI (красный) и TSI (зеленый) после применения полосового фильтра Баттерворта от 10 до 12 лет (б)

вейвлет-диаграмм и применении фильтрации. Таким образом, границы временных интервалов 1957–1986 и 1987–2014 гг. определены приблизительно и могут варьироваться в диапазоне нескольких лет.

Исходя из обнаруженных закономерностей можно выдвинуть гипотезу, что синхронизация и рассинхронизация квазиодиннадцатилетнего колебания солнечной активности и ЭНЮК влияет на ослабление и усиление отрицательных связей между ЭНЮК и ЮКМ на периодах около 11 лет. Поскольку TSI влияет и на ЭНЮК и на ЮКМ, то в период синхронизации TSI и ЭНЮК (с 1957 по 1986 г.) происходило ослабление отрицательной связи между ЭНЮК и ЮКМ на периоде

колебаний около 11 лет. В период же рассинхронизации TSI и ЭНЮК (с 1987 по 2014 г.) отрицательные связи между ЭНЮК и ЮКМ на таком же периоде колебаний усилились. Однако следует отметить, что климатические связи между ЭНЮК и ЮКМ зависят также от множества других факторов, например от доминирующего типа ЭНЮК: восточно-тихоокеанского и центрально-тихоокеанского (Yu et al., 2015).

В данной работе исследуются 72-летние временные ряды, то есть в интервал времени с 1950 по 2021 г. укладываются приблизительно 6–7 квазиодинадцатилетних периодов. На наш взгляд, основываясь на такой небольшой статистике, трудно привести убедительные доказательства гипотезы о возможном влиянии квазиодинадцатилетнего колебания солнечной активности на отрицательную связь между ЭНЮК и ЮКМ на периодах, приблизительно равных 11 годам. Однако в дальнейших исследованиях мы планируем проверить состоятельность выдвинутой гипотезы. Для этого предполагается привлечь результаты экспериментов *piControl* и *Historical* моделей общей циркуляции атмосферы и океана, входящих в *Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6)* (Eyring et al., 2016). Поскольку в экспериментах *Historical* присутствует форсинг от TSI, а в экспериментах *piControl* исключено какое-либо внешнее воздействие, то анализ результатов этих экспериментов может прояснить: влияют ли изменения солнечной активности на периоды колебаний ЭНЮК и ЮКМ. Также анализ продолжительных (более 150 лет) модельных временных рядов позволит оценить возможные связи между ГАО, ЭНЮК, ЮКМ и TSI с большей статистической значимостью, чем это сделано в настоящей работе по результатам реанализа данных наблюдений, которых в регионе Южного океана имеется относительно мало.

4. Заключение

Рассчитано поле средних отклонений межгодовой изменчивости аномалий атмосферного давления на уровне моря при ЭНЮК от глобальной атмосферной осцилляции. Это поле показало, что ГАО включает в себя, помимо ЭНЮК, еще и межгодовую изменчивость аномалий ДУМ, характерную для ЮКМ. Также показано, что ГАО не включает в себя полностью изменчивость ДУМ, связанную с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья центрально-тихоокеанского типа. Во всех остальных узлах сетки поле средних отклонений ЭНЮК от ГАО имеет разности ДУМ, слабо отличающиеся от нуля и формально статистически незначимые. Это означает, что в межгодовой климатической изменчивости ДУМ, ассоциированной с ГАО, существуют только две моды: ЭНЮК и ЮКМ.

С помощью кросс-вейвлетного анализа индексов ЭНЮК и ЮКМ обнаружены их отрицательные связи на периодах колебаний, близких к 11 годам. Анализ этих индексов и временного ряда TSI позволил выдвинуть гипотезу о влиянии синхронизации и рассинхронизации квазиодинадцатилетнего колебания солнечной активности и ЭНЮК на ослабление и усиление отрицательных связей между ЭНЮК и ЮКМ на периодах, близких к 11 годам. Проверка данной гипотезы является предметом для дальнейших исследований.

Литература / References

- Bas.ac.uk (2022). British Antarctic Survey — An observation-based Southern Hemisphere Annular Mode Index. [online] Available at: <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html> [Accessed: 15.03.2022].
- Bertler, N. A. N., Naish, T. R., Mayewski, P. A. and Barrett, P. J. (2006). Opposing oceanic and atmospheric ENSO influences on the Ross Sea Region, Antarctica. *Adv. Geosci.*, 6, 83–86.
- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 97, 163–172.
- Byshev, V. I., Neiman, V. G., Ponomarev, V. I., Romanov, Yu. A., Serykh, I. V. and Tsurikova, T. V. (2014). The Influence of Global atmospheric oscillation on formation of climate anomalies in the Russian Far East. *Doklady Earth Sciences*, 458 (1), 1116–1120.
- Cane, M. A. and Zebiak, S. E. (1985). A theory for El Niño and the Southern Oscillation. *Science*, 228, 1084–1087.
- Cai, W., Sullivan, A. and Cowan, T. (2011). Interactions of ENSO, the IOD, and the SAM in CMIP3 Models. *Journal of Climate*, 24, 1688–1704.
- Coddington, O., Lean, J., Pilewskie, P., Snow M. and Lindholm D. (2016). A solar irradiance climate data record. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97 (7), 1265–1282.
- Cpc.ncep.noaa.gov (2022). NOAA Climate Prediction Centre — Historical El Niño / La Niña episodes (1950–present). [online] Available at: https://cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensos-tuff/ONI_v5.php [Accessed: 15.03.2022].
- Crockart, C. K., Vance, T. R., Fraser, A. D., Abram, N. J., Criscitiello, A. S., Curran, M. A. J., Favier, V., Gallant, A. J. E., Kittel, Ch., Kjær, H. A., Klekociuk, A. R., Jong, L. M., Moy, A. D., Plummer, Ch. T., Vallelonga, P. T., Wille, J. and Zhang, L. (2021). El Niño–Southern Oscillation signal in a new East Antarctic ice core, Mount Brown South. *Clim. Past*, 17, 1795–1818.
- Dätwyler, C., Grosjean, M., Steiger, N. J. and Neukom, R. (2020). Teleconnections and relationship between the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and the Southern Annular Mode (SAM) in reconstructions and models over the past millennium. *Clim. Past*, 16, 743–756.
- Ding, H., Greatbatch, R. J. and Gollan, G. (2014). Tropical influence independent of ENSO on the austral summer Southern Annular Mode. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3643–3648.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958.
- Ferster, B. S., Subrahmanyam, B. and Macdonald, A. M. (2018). Confirmation of ENSO–Southern Ocean Teleconnections Using Satellite-Derived SST. *Remote Sens.*, 10, 331.
- Gong, D. and Wang, S. (1999). Definition of Antarctic oscillation index. *Geophys. Res. Lett.*, 26, 459–462.
- Grinsted, A., Moore, J. C., and Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlin. Processes Geophys.*, 11, 561–566.
- Guan, Y., Huang, B., Zhu, J., Hu, Z.-Z. and Kinter, J. L. (2014). Interannual variability of the South Pacific Ocean in observations and simulated by the NCEP Climate Forecast System, vers. 2. *Clim Dyn.*, 43, 1141–1157.
- Han, T., Wang, H. and Sun, J. (2017). Strengthened relationship between the Antarctic Oscillation and ENSO after the mid-1990s during austral spring. *Adv. Atmos. Sci.*, 34, 54–65.
- Hsu, Y. C., Lee, C. P., Wang, Y. L., Wu, C. R. and Lui, H. K. (2018). Leading El-Niño SST Oscillations around the Southern South American Continent. *Sustainability*, 10, 1783.
- Huang, B., Thorne, P. W., Banzon, V. F., Boyer, T., Chepurin, G., Lawrimore, J. H. and Zhang, H. M. (2017). Extended Reconstructed Sea Surface Temperature, vers. 5 (ERSSTv5): Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*, 30, 8179–8205.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W. G., Diven, D., Gandin, L. S., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J. E., Mo, K. S., Ropelevsky, K., Wang, J. and Letmaa, A. (1996). The NMC/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 77, 437–471.
- Kim, B. M., Choi, H., Kim, S. J. and Choi, W. (2017). Amplitude-dependent relationship between the Southern Annular Mode and the El Niño Southern Oscillation in austral summer. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 53, 85–100.

- Lasp.colorado.edu (2022). LASP Interactive Solar Irradiance Data Center — NRLTSI2 Monthly Averages, Time Series. [online] Available at: https://lasp.colorado.edu/lisird/data/nrl2_tsi_P1M/ [Accessed: 15.03.2022].
- Lee, D. Y., Petersen, M. R. and Lin, W. (2019). The Southern Annular Mode and Southern Ocean Surface Westerly Winds in E3SM. *Earth Sp. Sci.*, 6, 2624–2643.
- Li, F., Wang, H. and Gao, Y. (2015). Modulation of Aleutian Low and Antarctic Oscillation co-variability by ENSO. *Clim. Dyn.*, 44, 1245–1256.
- Lim, E., Hendon, H. H. and Rashid, H. (2013). Seasonal Predictability of the Southern Annular Mode due to Its Association with ENSO. *Journal of Climate*, 26 (20), 8037–8054.
- Marshall, G. J. (2003). Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *J. Clim.*, 16, 4134–4143.
- Peng J. B., Chen L. T. and Zhang Q. Y. (2014). The relationship between the El Niño/La Niña cycle and the transition chains of four atmospheric oscillations. Part I: The four oscillations. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (2), 468–479.
- Pohl, B., Fauchereau, N., Reason, C. J. C. and Rouault, M. (2010). Relationships between the Antarctic Oscillation, the Madden–Julian Oscillation, and ENSO, and Consequences for Rainfall Analysis. *Journal of Climate*, 23 (2), 238–254.
- Rahaman, W., Chatterjee, S., Ejaz, T. and Thamban, M. (2019). Increased influence of ENSO on Antarctic temperature since the Industrial Era. *Sci. Rep.*, 9, 6006.
- Serykh, I. V. and Sonechkin, D. M. (2019). Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. *Theoretical and Applied Climatology*, 137 (3–4), 2639–2656.
- Serykh, I. V. and Sonechkin, D. M. (2020). Interrelations between temperature variations in oceanic depths and the Global atmospheric oscillation. *Pure and Applied Geophysics*, 177 (12), 5951–5967.
- Serykh, I. V. and Sonechkin D. M. (2021a). El Niño–Global Atmospheric Oscillation as the main mode of interannual climate variability. *Atmosphere*, 12 (11), 1443.
- Serykh, I. V. and Sonechkin, D. M. (2021b). El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. *International Journal of Climatology*, 41, 3781–3792.
- Serykh, I. V., Sonechkin, D. M., Byshev, V. I., Neiman, V. G. and Romanov Yu. A. (2019). Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. *Pure and Applied Geophysics*, 176 (8), 3737–3755.
- Stepanov V. N. (2019). The Impact of the Processes in the Southern Ocean on ENSO Development. *Earth Sciences*, 8 (2), 117–125.
- Thompson, D., Solomon, S., Kushner, P., England, M. H., Grise, K. M. and Karoly, D. J. (2011). Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geosci.*, 4, 741–749.
- Torrence, D. C. and Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61–78.
- Torrence, D. C. and Webster, P. J. (1999). Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system. *J. Climate*, 12, 2679–2690.
- Turney, C. S. M., Fogwill, C. J., Palmer, J. G., Seville, E., Thomas, Z., McGlone, M., Richardson, S., Wilms-hurst, J. M., Fenwick, P., Zunz, V., Goosse, H., Wilson, K.-J., Carter, L., Lipson, M., Jones, R. T., Harsch, M., Clark, G., Marzinelli, E., Rogers, T., Rainsley, E., Ciasto, L., Waterman, S., Thomas, E. R. and Visbeck, M. (2017). Tropical forcing of increased Southern Ocean climate variability revealed by a 140-year subantarctic temperature reconstruction. *Clim. Past*, 13, 231–248.
- Vakulenko, N. V., Kotlyakov, V. M., Monin, A. S. and Sonechkin, D. M. (2004). Evidence for the leading role of temperature variations relative to greenhousegas concentration variations in the Vostoc ice core record. *Doklady Earth Sciences*, 397 (5), 663–667.
- Vakulenko, N. V., Serykh, I. V. and Sonechkin, D. M. (2018). Chaos and order in atmospheric dynamics Part 3. Predictability of El Niño. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Prikladnaia Nelineynaya Dinamika*, 26 (4), 75–94.
- Wallace, J. M. and Thompson, D. W. J. (2002). The Pacific Center of Action of the Northern Hemisphere Annular Mode: Real or Artifact? *Journal of Climate*, 15 (14), 1987–1991.
- Wang, G. and Cai, W. (2013). Climate-change impact on the 20th-century relationship between the Southern Annular Mode and global mean temperature. *Sci. Rep.*, 3, 2039.
- Wyrtki, K. (1975). El Niño — The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 572–584.

- Yeo, S. R. and Kim, K. Y. (2015). Decadal changes in the Southern Hemisphere sea surface temperature in association with El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode. *Clim. Dyn.*, 45, 3227–3242.
- Yu, J., Paek, H., Saltzman, E. S. and Lee, T. (2015). The Early 1990s Change in ENSO–PSA–SAM Relationships and Its Impact on Southern Hemisphere Climate. *Journal of Climate*, 28 (23), 9393–9408.
- Yuan X. (2004). ENSO-related impacts on Antarctic Sea ice: A synthesis of phenomenon and mechanisms. *Antarctic Science*, 16 (4), 415–425.
- Yiu, Y. Y. S. and Maycock, A. C. (2020). The linearity of the El Niño teleconnection to the Amundsen Sea region. *QJR Meteorol Soc.*, 146, 1169–1183.
- Zheng, F., Li, J. and Ding, R. (2017). Influence of the preceding austral summer Southern Hemisphere annular mode on the amplitude of ENSO decay. *Adv. Atmos. Sci.*, 34, 1358–1379.

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2022 г.
Статья рекомендована к печати 15 октября 2022 г.

Контактная информация:

Серых Илья Викторович — iserykh@ocean.ru
Сонечкин Дмитрий Михайлович — dsonech@yandex.ru

Link of El Niño — Southern Oscillation and Southern Annular Mode as elements of Global Atmospheric Oscillation*

I. V. Serykh, D. M. Sonechkin

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskiy pr., Moscow, 117997, Russian Federation

For citation: Serykh, I. V., Sonechkin, D. M. (2022). Link of El Niño — Southern Oscillation and Southern Annular Mode as elements of Global Atmospheric Oscillation. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (4), 614–630. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404> (In Russian)

Based on the monthly average data of NCEP/NCAR Reanalysis, using a specially developed technique, the interannual variability of the sea level pressure (SLP) anomalies associated with the Global Atmospheric Oscillation (GAO) for the period 1950–2021 was studied. The field of mean deviations of the SLP anomalies during the El Niño — Southern Oscillation (ENSO) from the interannual GAO variability has been calculated. It is shown that the variability of the SLP anomalies during the GAO contains, in addition to the mode associated with the ENSO, also the mode of interannual climatic variability associated with the Antarctic Oscillation (AAO) — the Southern Annular Mode (SAM). It was found that the GAO does not include a part of the SLP anomaly variability associated with El Niño and La Niña events of the Central Pacific type. At all other grid nodes, the field of mean deviations of the SLP anomalies in the ENSO from the GAO has SLP differences slightly different from zero and formally statistically insignificant. This means that in the interannual climatic variability of the SLP associated with the GAO, there are only two modes: ENSO and SAM. With the help of cross-wavelet analysis, the relationships between the ENSO and SAM indices were studied. Negative relationships were found between these indices on fluctuation periods of about 11 years. An analysis of the time series of these indices and the time series of total solar irradiance (TSI) made it possible to put forward a hypothesis about the influence of synchronization and desynchronization

* The study was carried out within the framework of the state task of the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences on topic no. FMWE-2021-0003 “Large-scale, wave and eddy ocean processes and the role of the ocean in climate formation: interdecadal evolution of circulation, ocean hydrophysical fields and flows at the ocean-atmosphere boundary in a changing climate”.

of quasi-11-year changes in solar activity and ENSO on the weakening and strengthening of negative relationships between ENSO and SAM at periods of oscillations of about 11 years.

Keywords: El Niño — Southern Oscillation, Antarctic Oscillation, Southern Annular Mode, Global Atmospheric Oscillation, 11-year solar cycle.

Received: April 23, 2022

Accepted: October 15, 2022

Authors' information:

Ilya V. Serykh — iserykh@ocean.ru

Dmitry M. Sonechkin — dsonech@yandex.ru