Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 607—631.
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):607—631.

КЛИМАТОЛОГИЯ

Научная статья
УДК [551.583:001.891.573]:551.465.7
doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-607-631

Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо — Южного колебания в моделях CMIP6

Илья Викторович Серых, Дмитрий Михайлович Сонечкин

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, iserykh@ocean.ru

Аннотация. По результатам эксперимента piControl моделей CMIP6 исследована глобальная межгодовая изменчивость среднемесячных аномалий температуры воздуха у поверхности и атмосферного давления на уровне моря. Установлено, что некоторые модели CMIP6 достаточно близко воспроизводят свойственную для Эль-Ниньо — Южного колебания планетарную структуру амплитуды осцилляций аномалий температуры и давления. Показано, что часть рассмотренных моделей демонстрирует дальние связи Эль-Ниньо — Южного колебания со всем тропическим поясом Земли, а также с умеренными и высокими широтами.

Ключевые слова: Эль-Ниньо — Южное колебание, модели CMIP6, температура воздуха, атмосферное давление, планетарная структура, дальние связи.

Благодарности. Работа выполнена 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».

Для цитирования: Серых И.В., Сонечкин Д. М. Глобальная структура дальних связей Эль-Ниньо — Южного колебания в моделях CMIP6 // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 607—631. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-607-631.

CLIMATOLOGY

Original article

ENSO global teleconnections structure in CMIP6 models

Ilya V. Serykh, Dmitry M. Sonechkin

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, iserykh@ocean.ru

Summary. The results of the piControl experiment of atmospheric and ocean general circulation models participating in the sixth stage of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) are studied.

© Серых И. В., Сонечкин Д. М., 2023

The 50 CMIP6 models considered have significant differences among themselves in the following main characteristics of the ENSO: the standard deviation of the ENSO index, its minimum and maximum values, the average period between events, and the average duration of El Niño and La Niña events. Some CMIP6 models reproduce the main characteristics of the ENSO and the asymmetry between the El Niño and La Niña events with noticeable differences from those observed in instrumental measurements. The global interannual variability of monthly anomalies of air temperature near the surface and atmospheric sea level pressure is considered. The amplitudes of fluctuations of the anomalies of these meteorological fields between opposite phases of the Global Atmospheric Oscillation (GAO), whose regional element in the Pacific tropics is the El Niño — Southern Oscillation (ENSO), are calculated. It is shown that a significant part of the considered 50 CMIP6 models demonstrate ENSO-related fluctuations in the studied fields not only in the equatorial region of the Pacific Ocean, but also in the entire tropical belt of the Earth, as well as in middle and high latitudes. At the same time, many of CMIP6 models quite closely reproduce the planetary spatial structure of the amplitude of fluctuations of temperature and pressure anomalies characteristic of GAO. However, the estimates of the energy spectra of the ENSO and GAO indices obtained from the models differ from the spectra obtained earlier from observational data, where peaks are observed at the periods of super- and sub-harmonics of external forces affecting the climate system. Thus, some of the CMIP6 models describe teleconnections between the ENSO and the tropics outside the Pacific Ocean, as well as with middle and high latitudes. Nevertheless, the CMIP6 models in the piControl experiment do not reproduce the temporal dynamics of the ENSO and GAO accurately enough, since in it, except for the annual variation of heat input from the Sun, there is no influence of other external forces on the global climate system.

Keywords: El Niño — Southern Oscillation, CMIP6 models, air temperature, atmospheric pressure, planetary structure, teleconnections.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Shirshov Institute of Oceanology RAS 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, hydrophysical fields of the ocean and flows at the ocean-atmosphere boundary in a changing climate.”

For citation: Serykh I. V., Sonechkin D. M. ENSO global teleconnections structure in CMIP6 models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology.* 2023;(73):607—631. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-607-631.

Введение

Явление Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) в Тихом океане влияет на атмосферную и океаническую циркуляцию, морские и наземные экосистемы в глобальном масштабе [1]. Масштаб и величина гидрометеорологических аномалий, связанных с событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья, делает ЭНЮК главным фактором глобальной межгодовой климатической изменчивости [2]. ЭНЮК оказывает воздействие на весьма удаленные от тропиков Тихого океана регионы посредством нестационарных атмосферных дальних связей [3], поэтому важное значение имеет вопрос изменения этих дальних связей в прошлом и в будущем.

В работе [4] сравниваются дальние связи ЭНЮК с приповерхностной температурой и осадками в историческом эксперименте (Historical) и экспериментах на будущее с различными сценариями выбросов парниковых газов (Shared Socioeconomic Pathways — SSP) моделей шестого этапа Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 6 — CMIP6) [5]. Обнаружены значительные будущие изменения дальних связей ЭНЮК (2081 г.—2100 г.) и осадков по сравнению с 1950 г. по 2014 г. В дополнение к этому во многих регионах эти изменения в дальних связях ЭНЮК масштабируются с прогнозируемым уровнем потепления, при этом более сильное потепление приводит к более значительным изменениям в дальних связях.

В экспериментах SSP изменчивость температуры поверхности океана (ТПО) в большинстве моделей CMIP6 усиливается в разной степени [6]. Это увеличение связано с ослаблением температурного градиента с востока на запад в тропической части Тихого океана, что демонстрирует большинство моделей. При этом многие характеристики будущего ЭНЮК остаются неопределенными. Это включает в себя изменения в преобладающих периодах флуктуаций ЭНЮК (2—7 лет), во внетропических дальних связях и амплитуде явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При этом их важной особенностью является то, что для моделей с самым сильным увеличением будущей изменчивости ТПО большая часть увеличения происходит в восточной части Тихого океана, где обычно происходят самые сильные явления Эль-Ниньо.

Прогнозы амплитуды ЭНЮК в моделях CMIP5 (предыдущий этап Проекта сравнения моделей) и CMIP6 демонстрируют большой разброс в изменениях стандартного отклонения к концу XXI века [7]. При этом среднее по ансамблю изменение амплитуды ЭНЮК близко к нулю. Внутренняя изменчивость является основным фактором неопределенности в течение первых трех десятилетий, после этого преобладает модельный разброс, в то же время разница между сценариями относительно невелика на протяжении всего XXI века. При этом, несмотря на большую межмодельную изменчивость в связанных с ЭНЮК аномалиях ТПО, результаты моделирования зафиксировали устойчивую интенсификацию и смещение на восток вызванных ЭНЮК осадков в условиях глобального потепления [8].

Существуют устойчивые междесятилетние вариации интенсивности и местоположения основных аномалий при событиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья, которые связаны с возмущениями ветра и глубины термоклина на экваторе, а также с внетропическими аномалиями в северной и южной частях Тихого океана [9]. Некоторые климатические модели CMIP5 и CMIP6 способны моделировать такую междесятилетнюю изменчивость разнообразия ЭНЮК и связанные с ней крупномасштабные закономерности. Прогнозы разнообразия ЭНЮК в будущих сценариях изменения климата сильно зависят от величины этих междесятилетних вариаций и способности климатических моделей реалистично воспроизводить их в XXI веке.

Важным аспектом ЭНЮК является асимметрия между двумя его противоположными фазами: Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Результаты оценки воспроизведения этого свойства ЭНЮК моделями CMIP6 показывают, что модели по-прежнему недооценивают данную асимметрию [10]. Требуется модифицировать моделирование обратной связи между атмосферой и потоками тепла из океана. Данное обстоятельство может существенным образом повлиять на дальние связи событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в моделях CMIP6. Также важной особенностью ЭНЮК является наличие двух типов событий: восточно-тихоокеанского (ВТ) и центрально-тихоокеанского (ЦТ). В моделях CMIP6 амплитуда и пространственная структура ЦТ ЭНЮК воспроизводятся качественнее по сравнению с CMIP5 [11]. Однако существенного улучшения периодичности и фазовой синхронизации ЭНЮК по сравнению с CMIP5 не произошло.

В исследовании [12] оценивается сезонная фазовая синхронизации ЭНЮК в 42 моделях CMIP6, 43 моделях CMIP5 и данных наблюдений. Лишь несколько моделей (12 в CMIP5 и 15 в CMIP6) воспроизводят ЭНЮК с большей долей зимних пиковых явлений, что указывает на то, что сезонная синхронизация фаз ЭНЮК по-прежнему является проблемой для современных климатических моделей. Таким образом, в большинстве моделей CMIP5 и CMIP6 не удается воспроизвести фазовую синхронизацию ЭНЮК, поскольку вклад зональной адвективной обратной связи в сезонную модуляцию скорости роста ТПО намного меньше по сравнению с наблюдениями [13, 14]. Также не было выявлено последовательной связи между изменениями годового цикла и амплитуды ЭНЮК в палеоклиматических экспериментах с моделями CMIP5/6 [15].

ЭНЮК взаимодействует с Индоокеанским диполем (ИОД), что делает необходимым одновременное моделирование ЭНЮК и ИОД. При использовании 32 моделей CMIP5 и 34 моделей CMIP6 в [16] обнаружено, что имеются изменения в основных характеристиках ЭНЮК и ИОД в CMIP6 по сравнению с CMIP5. Во-первых, наблюдается небольшое смещение сезонности ИОД в сторону более раннего пика в сентябре в CMIP6 по сравнению с ноябрем в CMIP5. Во-вторых, межмодельный разброс частоты ЭНЮК и ИОД уменьшился в CMIP6 по сравнению с CMIP5. Большинство моделей CMIP6 могут воспроизводить ведущую моду дипольных колебаний аномалий теплосодержания между востоком и западом тропической части Индийского океана, но в значительной степени переоценивают амплитуду и доминирующий период подповерхностного ИОД [17].

Циркуляция Уокера является одним из основных компонентов глобальной климатической системы. Она связывает изменчивость температуры поверхности Тихого океана с изменчивостью климата в акваториях других океанов вплоть до средних и высоких широт. Однако атмосферная обратная связь, связанная с ЭНЮК, в частности, реакция приповерхностного ветра, в значительной степени недооценивается в моделях CMIP5/6 [18]. Также выявлены различия в характеристиках давления на уровне моря (ДУМ) и циркуляции Уокера между различными моделями. В то время как отклики ДУМ на изменчивость ТПО, связанную с Эль-Ниньо, хорошо воспроизводятся в большинстве моделей; отклики функции тока циркуляции Уокера в большинстве этих моделей в значительной степени недооцениваются.

Существуют предикторы ЭНЮК, связанные с Северо-Тихоокеанским колебанием (North Pacific Oscillation — NPO): зарядка пассатами («trade wind charging» — TWC) подповерхностного теплосодержания на экваторе Тихого океана и меридиональная мода северной части Тихого океана (Northern Pacific meridional mode — NPMM) [19]. В работе [20] проведена оценка воспроизведения режима TWC/NPMM и его взаимосвязи с ЭНЮК в моделях высокого разрешения CMIP6. Обнаружено, что TWC/NPMM, несмотря на некоторые пространственные вариации, является последовательным предшественником ЭНЮК по всему ансамблю моделей. Кроме того, предыдущие анализы данных, основанных на наблюдениях, показывают, что взаимосвязь TWC/NPMM с ЭНЮК является надежной, хотя и не стационарной, и ее вариации могут влиять на характерную изменчивость

самой ЭНЮК. При этом взаимосвязь между ЭНЮК и зимней синоптической изменчивостью температуры над Азиатско-Тихоокеанско-Американским регионом в большинстве моделей CMIP5/6 воспроизводится с существенными отличиями от данных наблюдений [21].

Модели CMIP6 могут хорошо воспроизводить сигналы ЭНЮК в арктической стратосфере и имеют улучшенные характеристики по сравнению с моделями CMIP5 [22]. В частности, события Эль-Ниньо связаны с усиленным тихоокеанско-североамериканским паттерном (Pacific–North American — PNA), который приводит к теплому и ослабленному стратосферному полярному вихрю. Случай с Ла-Нинья почти противоположный, он связан с холодным и усиленным стратосферным полярным вихрем. По сравнению с ЭНЮК-нейтральными зимами внезапное потепление в стратосфере происходит чаще (реже) во время Эль-Ниньо (Ла-Нинья), что воспроизводится некоторыми моделями CMIP6. Также отклик стратосферы Арктики на явления Эль-Ниньо зависит от их типа: восточно- и центрально-тихоокеанского [23].

В работах [24—28] предпринята попытка объединить прямые и обратные дальние связи между ЭНЮК и климатическими процессами по всей Земле в одно планетарное явление, которое названо Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО). Анализ глобальных вариаций гидрометеорологических параметров между противоположными фазами ГАО в моделях общей циркуляции атмосферы и океана, участвующих в пятом этапе Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 5 — CMIP5), показал воспроизведение планетарной пространственной структуры ГАО некоторыми из рассмотренных климатических моделей [29].

В [30] обнаружено, что модели CMIP6 значительно превосходят модели CMIP5 по 8 из 24 показателей, относящихся к ЭНЮК, при этом большинство моделей CMIP6 демонстрируют улучшенную сезонность тропической части Тихого океана и дальние связи ЭНЮК. В [31] выявлены значительные улучшения в представлении ЭНЮК моделями CMIP6 по сравнению с CMIP5. Погрешности амплитуды и пространственной структуры аномалий уменьшились при переходе от поколения к поколению моделей. Например, уменьшились смещения связанных с ЭНЮК аномалий ТПО в экваториальной части Тихого океана, которые в моделях простираются слишком далеко на запад. При этом изменения спектров ЭНЮК малы по сравнению с внутренней изменчивостью, что не позволяет делать однозначные заявления об улучшении.

Таким образом, целью данной работы является исследование воспроизведения моделями CMIP6 внетропических дальних связей ЭНЮК и планетарной пространственной структуры ГАО.

Методика исследования

Исследованы глобальные данные температуры воздуха у поверхности (ТВП) и атмосферного давления на уровне моря, полученные в результате предындустриального контрольного эксперимента (preindustrial control — piControl)

климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, входящих в шестой этап Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 6 — CMIP6) [5]. В эксперименте piControl отсутствует внешний форсинг от изменений концентрации парниковых газов в атмосфере и вариаций солнечного излучения. Из внешних сил, воздействующих на климатическую систему, в эксперименте piControl присутствует только годовой ход поступления тепла от Солнца. При этом выполненные в рамках эксперимента piControl совместные расчеты общей циркуляции атмосферы и океана покрывают продолжительные временные периоды, меняющиеся для разных моделей в диапазоне 250—1200 лет. Названия и основные характеристики анализируемых 52 моделей представлены в табл. 1 (столбцы 1—3). Модели GISS-E2-2-H и KACE-1-0-G исключены из дальнейшего рассмотрения по причине обнаружения в них сильного изменения (так называемого «дрейфа») ТВП в центрально-восточной части экваториальной области Тихого океана, более подробно описанного ниже. Таким образом, весь последующий анализ и усреднения производятся по результатам эксперимента piControl 50 моделей CMIP6, перечисленных в табл. 1.

Чтобы определить события Эль-Ниньо и Ла-Нинья в данной работе используется индекс, который называется Расширенный океанический индекс Ниньо (Extended Oceanic Niño Index — EONI) [32]. EONI представляет собой средние значения аномалий ТВП в экваториальном регионе Тихого океана (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170°—80° з.д.). Этот регион шире, чем регион Nino3.4 (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170°—120° з.д.), в котором аномалии ТПО используются для построения стандартного для изучения явления ЭНЮК индекса ONI. Усреднение аномалий ТВП по более обширному региону в EONI обуславливается различиями между моделями в пространственном расположении наибольших аномалий ТПО при событиях Эль-Ниньо и Ла-Нинья. В разных моделях характерная пространственная структура — так называемый «язык» положительных (отрицательных) аномалий ТПО при Эль-Ниньо (Ла-Нинья) — может доходить вдоль экватора от побережья Южной Америки, как до центра Тихого океана, так до побережья Индонезии. Также не все модели в должной мере воспроизводят события ЭНЮК центрально-тихоокеанского типа [33]. Вот почему в расчет индекса EONI, по которому в настоящей работе определяются события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, включен как центральный, так и восточный экваториальный районы Тихого океана. Таким образом, EONI характеризует как восточно-тихоокеанские, так и центрально-тихоокеанские события ЭНЮК.

В каждом узле сетки отдельно взятой модели вычислены аномалии ТВП и ДУМ относительного среднего годового хода за весь период результатов эксперимента piControl этой модели. Затем аномалии ТВП усреднялись в регионе (5° с.ш.—5° ю.ш., 170°—80° з.д.), и полученный временной ряд сглаживался трехмесячным скользящим средним для получения своего собственного для каждой модели временного ряда EONI. Затем по полученным EONI отдельно для каждой модели определялись события Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При Эль-Ниньо (Ла-Нинья) значения EONI должны непрерывно превышать +0,5 °C (быть менее −0,5 °C) на протяжении 5 месяцев и более. Использование данных ТВП, а не ТПО

обусловлено тем, что они очень близки друг к другу, но данные ТВП покрывают и сушу, что позволяет оценивать более полную картину при анализе температурных полей.

В таблице 1 (столбец 4) приведены изменения EONI, оцененные линейными приближениями с помощью метода наименьших квадратов. Модели GISS-E2-2-H и KACE-1-0-G демонстрируют существенное изменение («дрейф») EONI, поэтому они были исключены из дальнейшего анализа. Таким образом, далее будут рассмотрены 50 моделей CMIP6, имеющих незначительный линейный тренд изменений ТВП в регионе (5° с.ш.—5° ю.ш., 170°—80° з.д.).

Таблица 1

Основные характеристики ЭНЮК исследуемых моделей CMIP6

Main ENSO characteristics of the studied CMIP6 models

Название модели	Разрешение (°ш. × °д.)	Число лет в эксперименте	Изменение EONI (°C за 100 лет)	Стандартное отклон. EONI (°C)	Мин. значение EONI (°C)	Макс. значение EONI (°C)	Сред. период ЭНЮК (годы)	Продолжительность Эль-Ниньо (месяцы)	Продолжительность Ла-Ниньи (месяцы)
NASA GISS-E2-2-H	2,000 × 2,500	251	–0,13	Модель исключена из дальнейшего рассмотрения					
NIMS KACE-1-0-G	1,250 × 1,875	450	0,25	Модель исключена из дальнейшего рассмотрения					
AS-RCEC TaiESM1	0,938 × 1,250	500	0,00	0,87	–2,91	3,73	4,02	11,7	11,2
AWI-CM-1-1-MR	0,938 × 0,938	500	0,00	0,87	–3,36	**4,40**	3,62	9,8	10,2
BCC-CSM2-MR	1,125 × 1,125	600	0,03	1,03	–3,64	3,17	2,84	9,9	10,0
BCC-ESM1	2,812 × 2,812	451	0,01	0,65	–2,56	2,00	3,76	**7,8**	7,7
CAMS-CSM1-0	1,125 × 1,125	500	0,02	**1,18**	**–4,37**	3,02	**2,82**	10,4	10,9
CAS-ESM2-0	1,406 × 1,406	550	0,02	1,03	–3,35	3,40	3,47	11,5	11,7
CAS FGOALS-f3-L	1,000 × 1,250	561	0,01	1,06	–3,01	2,70	3,28	12,8	13,4
CAS FGOALS-g3	2,250 × 2,000	700	–0,02	0,88	–3,12	2,34	3,24	10,5	9,9
CanESM5	2,812 × 2,812	1000	–0,01	0,58	–1,97	2,26	5,06	10,5	9,9
CanESM5-CanOE	2,812 × 2,812	501	–0,01	0,62	–2,15	2,15	4,55	10,4	10,5
CMCC-CM2-SR5	0,938 × 1,250	500	0,06	0,89	–2,56	4,21	4,93	14,6	14,2
CMCC-ESM2	0,938 × 1,250	500	0,02	**1,18**	–3,27	4,20	4,61	**17,6**	**17,2**
CNRM-CM6-1	1,406 × 1,406	500	0,03	0,70	–2,28	2,04	4,20	10,3	10,3
CNRM-CM6-1-HR	0,500 × 0,500	300	0,06	0,48	–1,66	1,56	7,32	9,3	9,5
CNRM-ESM2-1	1,406 × 1,406	500	–0,02	0,74	–3,01	2,24	3,69	9,5	9,2
CSIRO ACCESS-CM2	1,250 × 1,875	500	0,04	0,83	–3,34	2,30	3,24	10,0	9,0
ACCESS-ESM1-5	1,241 × 1,875	900	0,00	0,78	–3,03	2,41	3,71	11,0	10,9
E3SM-1-0	1,000 × 1,000	500	0,00	0,78	–3,37	2,63	3,76	9,6	9,6
EC-Earth3	0,703 × 0,703	501	–0,01	0,54	–1,97	2,37	5,76	9,8	8,9
EC-Earth3-AerChem	0,703 × 0,703	311	–0,03	0,48	–1,69	1,67	7,32	9,0	8,0

Окончание табл. 1

Название модели	Разрешение (°ш. × °д.)	Число лет в эксперименте	Изменение EONI (°C за 100 лет)	Стандартное отклон. EONI (°C)	Мин. значение EONI (°C)	Макс. значение EONI (°C)	Сред. период ЭНОК (годы)	Продолжительность Эль-Ниньо (месяцы)	Продолжительность Ла-Нинья (месяцы)
EC-Earth3-Veg	0,703 × 0,703	500	0,01	0,58	–2,52	1,75	4,78	9,2	9,0
EC-Earth3-Veg-LR	1,125 × 1,125	501	0,02	0,50	–2,00	1,68	5,86	8,7	8,1
FIO-ESM-2-0	0,938 × 1,250	575	0,00	0,67	–2,33	3,20	4,73	10,9	10,2
MPI-ESM-1-2-HAM	1,875 × 1,875	1000	0,00	0,71	–2,52	2,91	4,76	11,7	10,2
INM-CM4-8	1,500 × 2,000	531	–0,04	**0,40**	**–1,54**	**1,36**	**13,11**	8,2	7,6
INM-CM5-0	1,500 × 2,000	1201	–0,01	0,41	–1,73	1,63	10,72	8,0	**7,4**
IPSL-CM6A-LR	1,259 × 2,500	800	0,00	0,84	–2,75	2,79	3,70	12,0	11,9
KIOST-ESM	1,875 × 1,875	500	–0,07	1,09	–3,14	2,84	3,29	12,6	13,0
MIROC-ES2L	2,812 × 2,812	500	0,00	0,89	–2,56	2,87	5,00	15,7	15,8
MIROC6	1,406 × 1,406	800	0,01	0,77	–2,31	3,38	5,30	14,8	12,7
HadGEM3-GC31-LL	1,250 × 1,875	500	0,04	0,79	–2,94	3,36	4,00	11,4	10,6
HadGEM3-GC31-MM	0,556 × 0,833	500	0,07	0,76	–2,75	2,42	4,29	12,1	11,4
MPI-ESM1-2-HR	0,938 × 0,938	500	0,00	0,66	–2,25	2,35	5,78	14,7	11,0
MPI-ESM1-2-LR	1,875 × 1,875	1000	0,00	0,73	–2,69	3,89	4,71	12,8	11,5
MRI-ESM2-0	1,125 × 1,125	701	0,02	0,79	–2,65	2,61	3,91	11,0	10,9
NASA GISS-E2-1-G	2,000 × 2,500	851	0,00	1,07	–3,85	2,64	4,22	17,5	17,1
NASA GISS-E2-1-H	2,000 × 2,500	401	0,00	0,71	–2,24	2,67	4,92	13,6	11,6
NCAR CESM2	0,938 × 1,250	1200	0,02	0,92	–2,99	3,50	3,87	12,2	12,5
NCAR CESM2-FV2	1,875 × 2,500	500	0,00	1,07	–3,23	3,35	3,32	12,0	12,0
CESM2-WACCM	0,938 × 1,250	499	0,03	0,84	–3,09	3,53	3,93	11,8	11,2
CESM2-WACCM-FV2	1,875 × 2,500	500	0,03	1,14	–3,61	3,41	3,40	12,8	13,3
NCC NorCPM1	1,875 × 2,500	500	0,02	0,79	–2,84	2,61	3,79	11,0	11,2
NCC NorESM2-LM	1,875 × 2,500	501	0,02	1,07	–3,38	3,55	3,87	13,9	13,3
NCC NorESM2-MM	0,938 × 1,250	500	–0,01	1,10	–3,29	4,00	3,94	14,5	14,6
NOAA GFDL-CM4	1,000 × 1,250	500	0,04	0,72	–2,57	2,71	4,07	9,8	9,8
NOAA GFDL-ESM4	1,000 × 1,250	500	0,02	0,81	–3,03	3,57	4,10	11,0	12,3
NUIST NESM3	1,875 × 1,875	500	0,02	0,63	–2,32	2,08	5,15	10,1	9,5
SAM0-UNICON	0,938 × 1,250	700	–0,02	0,84	–3,27	3,72	3,78	10,8	9,9
THU CIESM	0,938 × 1,250	500	0,04	0,68	–2,26	2,44	4,52	11,0	11,7
UA MCM-UA-1-0	2,250 × 3,750	500	0,00	0,52	–1,69	2,26	8,06	12,4	10,4
Минимум				**0,40**	**–4,37**	**1,36**	**2,82**	**7,8**	**7,4**
Максимум				**1,18**	**–1,54**	**4,40**	**13,11**	**17,6**	**17,2**
Среднее				**0,79**	**–2,74**	**2,80**	**4,68**	**11,5**	**11,1**

Для нахождения положительных и отрицательных фаз ГАО использован индекс GAO1, который рассчитывается как сумма нормированных значений

аномалий ДУМ в десяти районах, совпадающих с максимумами и минимумами в пространственной структуре аномалий ДУМ поля ГАО [34]. GAO1 рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned}\mathrm{GAO1} = {} & P(5^\circ\ \text{ю.ш.} - 5^\circ\ \text{с.ш.},\ 145^\circ\text{–}155^\circ\ \text{в.д.}) + P(5^\circ\ \text{ю.ш.} - 5^\circ\ \text{с.ш.},\ 55^\circ\text{–}65^\circ\ \text{в.д.}) + \\ & + P(5^\circ\ \text{ю.ш.} - 5^\circ\ \text{с.ш.},\ 35^\circ\text{–}25^\circ\ \text{з.д.}) + P(55^\circ\text{–}65^\circ\ \text{с.ш.},\ 95^\circ\text{–}85^\circ\ \text{з.д.}) + \\ & + P(65^\circ\text{–}55^\circ\ \text{ю.ш.},\ 95^\circ\text{–}85^\circ\ \text{з.д.}) - P(5^\circ\ \text{ю.ш.} - 5^\circ\ \text{с.ш.},\ 95^\circ\text{–}85^\circ\ \text{з.д.}) - \\ & - P(45^\circ\text{–}55^\circ\ \text{с.ш.},\ 175^\circ\text{–}165^\circ\ \text{з.д.}) - P(45^\circ\text{–}55^\circ\ \text{с.ш.},\ 15^\circ\text{–}5^\circ\ \text{з.д.}) - \\ & - P(55^\circ\text{–}45^\circ\ \text{ю.ш.},\ 15^\circ\text{–}5^\circ\ \text{з.д.}) - P(55^\circ\text{–}45^\circ\ \text{ю.ш.},\ 175^\circ\text{–}165^\circ\ \text{з.д.}),\end{aligned}$$

где P — средние аномалии ДУМ в районах с заданными координатами.

Индекс GAO1 сглаживается трехмесячным скользящим средним, центрируется и нормируется на своё среднеквадратическое отклонение. Таким образом, среднее значение итогового временного ряда GAO1 равно 0, а его среднеквадратическое отклонение равняется 1. Если значения индекса GAO1 были больше (меньше) +0,5 (–0,5) на протяжении 5 месяцев и более, то этот промежуток времени относится к положительной (отрицательной) фазе ГАО.

Чтобы охарактеризовать дальние связи явления ЭНЮК с другими регионами, входящими в планетарную структуру ГАО, из GAO1 исключаются компоненты (5° ю.ш.—5° с.ш., 145°—155° в.д.) и (5° ю.ш.—5° с.ш., 95°—85° з.д). Поскольку аномалии ДУМ в этих районах используются при расчете экваториального индекса Южного колебания (ЮК) (Equatorial Southern Oscillation Index), то таким образом ГАО отделяется от ЮК [32]. Индекс ГАО без ЮК рассчитывается по нормированным аномалиям ДУМ в 8 районах по следующей формуле:

$$\begin{aligned}\mathrm{GAO2} = \mathrm{GAO1} - [{} & P(5^\circ\ \text{ю.ш.}\text{–}5^\circ\ \text{с.ш.},\ 145^\circ\text{–}155^\circ\ \text{в.д.}) - \\ & - P(5^\circ\ \text{ю.ш.}\text{–}5^\circ\ \text{с.ш.},\ 95^\circ\text{–}85^\circ\ \text{з.д})],\end{aligned}$$

где P — средние аномалии ДУМ в районах с заданными координатами.

Затем, чтобы охарактеризовать дальние связи ЭНЮК с внетропическими широтами, из индекса GAO2 исключаются районы в тропиках Индийского (5° ю.ш.—5° с.ш., 55°—65° в.д.) и Атлантического (5° ю.ш.—5° с.ш., 35°—25° з.д.) океанов. Получившийся индекс ГАО называется внетропическим индексом ГАО (Extratropical GAO – EGAO) [32]:

$$\begin{aligned}\mathrm{EGAO} = \mathrm{GAO2} - [{} & P(5^\circ\ \text{ю.ш.}\text{–}5^\circ\ \text{с.ш.},\ 55^\circ\text{–}65^\circ\ \text{в.д.}) + \\ & + P(5^\circ\ \text{ю.ш.}\text{–}5^\circ\ \text{с.ш.},\ 35^\circ\text{–}25^\circ\ \text{з.д.})],\end{aligned}$$

где P – средние аномалии ДУМ в районах с заданными координатами.

По всем описанным выше индексам EONI, GAO1, GAO2 и EGAO для каждой из рассматриваемых 50 моделей CMIP6 строились средние поля амплитуды колебаний аномалий ТВП и ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК и ГАО. По ним вычислялись среднемодельные поля и с помощью среднеквадратических отклонений оценивалась их межмодельная изменчивость.

Методом быстрого преобразования Фурье с максимальным разрешением оценены энергетические спектры описанных выше индексов ЭНЮК и ГАО. Каждая запись наблюдений любой гидрологической величины, даже если эта величина непрерывно изменяется, имеет конечную длину и конечное временное разрешение. Такая запись не может быть представлена интегралом Фурье $S(f)$, где f является

непрерывно изменяющейся частотой, а только конечным рядом коэффициентов Фурье $S(f_n)$ (где f_n из дискретной последовательности частот), соответствующих гармоникам, которые кратны общей длине записи. В результате действительная амплитуда гармоники Фурье, которая некратна общей длине записи, может быть недооценена, если эта амплитуда незначительно отличается от амплитуд ближайших гармоник. Чтобы избежать этого, можно использовать многократное вычисление периодограмм для записей, которые остаются после последовательного сокращения начальной записи. Затем все такие периодограммы совмещаются, и в случае совпадения периодов усредняются. Это увеличивает спектральное разрешение и, таким образом, позволяет точнее находить пики спектральной плотности на периодах, некратных общей длине исходной записи. По-видимому, впервые этот прием был применен в [35].

При использовании такого подхода спектры мощности оцениваются не только для общей длины записи, но также и для постепенно сокращенных временных рядов с последующим совмещением всех полученных периодограмм. Спектры с максимальным разрешением индексов ЭНЮК и ГАО строятся путем последовательного сокращения длин их временных рядов до половины от их первоначальной длины, поскольку при этом получаются наиболее непрерывные оценки спектральной плотности для всех частот. Спектры оцениваются сначала для ряда длиной N: (1, …, N); затем для двух рядов длины N−1: (1, …, N−1) и (2, …, N); затем для трех рядов длины N−2: (1, …, N−2), (2, …, N−1) и (3, …, N) и т.д., до N/2 рядов длины N/2: (1, …, N/2), (2, …, N/2+1), …, (N/2, …, N). Затем все полученные спектры индекса объединяются в один путем упорядочивания по частотам и усреднения при совпадении частот. При этом спектральная оценка индексов производится на годовом периоде [26, 32]. Для этого вычисляются спектры с максимальным разрешением индексов для каждого месяца года по отдельности. Затем полученные для каждого индекса 12 спектров усредняются. Данная методика спектральной оценки на периоде внешней силы позволяет уменьшить влияние этой периодичности на получающиеся спектры.

Результаты исследования

Среднее по 50 моделям CMIP6 среднеквадратическое отклонение EONI составляет 0,79 °C (таблица 1, столбец 5). Выбранный для определения событий ЭНЮК по EONI критерий 0,5 °C является меньше среднеквадратического отклонения этого индекса у большинства моделей CMIP6. Среднее минимальное значение EONI составляет −2,74 °C (таблица 1, столбец 6). Среднее максимальное значение EONI составляет +2,80 °C (таблица 1, столбец 7).

ЭНЮК присуща асимметрия, одной из особенностей которой является то, что абсолютные значения аномалий ТПО в экваториальной области Тихого океана при сильнейших событиях Эль-Ниньо выше, чем при сильнейших Ла-Нинья [36]. Данная асимметрия ЭНЮК наблюдается далеко не во всех рассмотренных 50 моделях CMIP6. Так, в некоторых моделях CMIP6 минимальные значения EONI оказались по модулю больше максимальных значений EONI (таблица 1).

Средний период ЭНЮК по 50 моделям CMIP6 составляет 4,68 г. (таблица 1, столбец 8). Он вычисляется для каждой модели как удвоенное число лет эксперимента, деленное на общее количество событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Средняя продолжительность событий Эль-Ниньо по 50 моделям CMIP6 составляет 11,5 месяца (таблица 1, столбец 9). Средняя продолжительность событий Ла-Нинья по 50 моделям CMIP6 составляет 11,1 мес. (таблица 1, столбец 10).

Некоторые модели CMIP6 демонстрируют более длительную среднюю продолжительность событий Эль-Ниньо, чем событий Ла-Нинья (таблица 1). Такая асимметрия продолжительности событий ЭНЮК, при которой события Эль-Ниньо длятся дольше, чем события Ла-Нинья, противоположна результатам, полученным по натурным данным. Так, за время надежных инструментальных наблюдений (1950—2022 гг.) происходили события Ла-Нинья (1954—1956 гг., 1998—2001 гг. и др.) существенно более продолжительные, чем любое из событий Эль-Ниньо, зафиксированное за этот временной период [37].

Таким образом, можно сделать вывод о наличии заметных различий в основных характеристиках ЭНЮК между моделями CMIP6 (таблица 1). Более того, по данным инструментальных измерений часть рассмотренных моделей CMIP6 воспроизводит основные характеристики ЭНЮК и асимметрию между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья с существенными отличиями от наблюдаемых. Исходя из этого, можно заключить, что далеко не все модели CMIP6 воспроизводят ЭНЮК с высокой точностью.

Перейдем к сравнению дальних связей ЭНЮК, которые воспроизводят рассматриваемые модели CMIP6. На рис. 1 представлены поля амплитуд колебаний средних аномалий ТВП между противоположными фазами ЭНЮК для 8 выбранных из 50 рассматриваемых моделей CMIP6. Следует обратить внимание, что некоторые из этих моделей достаточно хорошо воспроизводят пространственную структуру ГАО аномалий ТВП (поле ГАО ТВП), полученную ранее по данным наблюдений и реанализам [24, 25, 27, 34]. Поля ГАО ТВП построены по индексу EONI методом, описанным в разделе «Методика исследования», для всех рассматриваемых 50 моделей CMIP6. Оказалось, что существенная часть моделей CMIP6 довольно хорошо воспроизводит пространственную структуру поля ГАО ТВП, симметричную относительно экватора с учетом расположения континентов. При чем, по сравнению с моделями CMIP5 [29], число моделей в CMIP6, воспроизводящих глобальную пространственную структуру амплитуды колебаний аномалий ТВП между противоположными фазами ЭНЮК, существенно увеличилось. Таким образом, можно сделать вывод, что в моделях CMIP6 улучшилось описание дальних связей между ЭНЮК и ТВП вне тропиков Тихого океана по сравнению с моделями CMIP5.

Дополнительно построено среднее по рассматриваемым 50 моделям CMIP6 поле ГАО ТВП (рис. 2, *а*). Для этого полученные для каждой модели поля ГАО ТВП интерполировались на единую сетку 1°×1° и затем усреднялись между собой. Среднемодельное поле ГАО ТВП во многих деталях повторяет поля ГАО ТВП, полученные ранее по данным наблюдений и реанализам [24, 25, 27, 34]. На среднемодельном поле ГАО ТВП вдоль экватора центральной и восточной

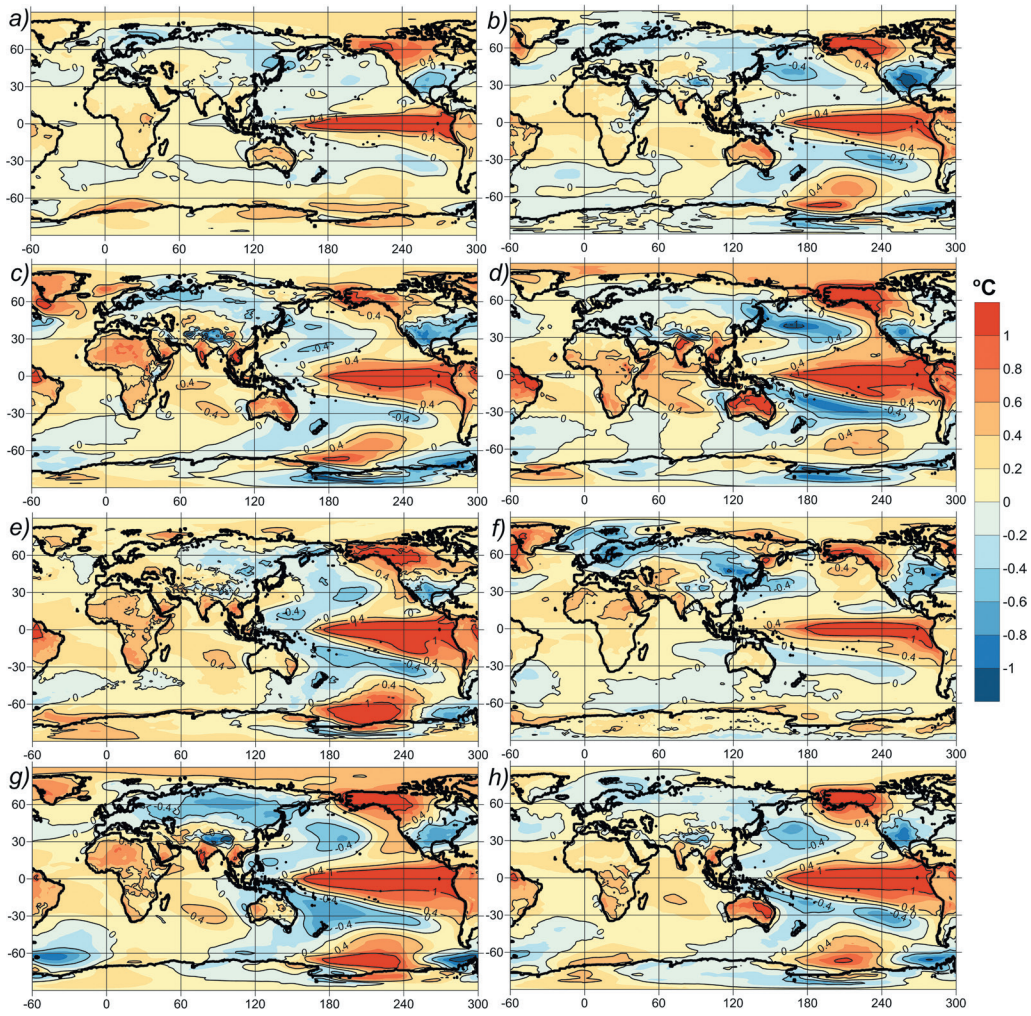

Рис. 1. Поля разности средних аномалий температуры воздуха у поверхности между противоположными фазами Эль-Ниньо-Южного колебания по индексу EONI для моделей: BCC-CSM2-MR (*a*), CNRM-ESM2-1 (*b*), EC-Earth3 (*c*), MIROC6 (*d*), HadGEM3-GC31-MM (*e*), INM-CM5-0 (*f*), NCAR CESM2 (*g*), NOAA GFDL-ESM4 (*h*).

Fig. 1. Difference fields of average surface air temperature anomalies between opposite phases of El Niño–Southern Oscillation according to EONI index for models: BCC-CSM2-MR (*a*), CNRM-ESM2-1 (*b*), EC-Earth3 (*c*), MIROC6 (*d*), HadGEM3-GC31-MM (*e*), INM-CM5-0 (*f*), NCAR CESM2 (*g*), NOAA GFDL-ESM4 (*h*).

части Тихого океана наблюдаются положительные аномалии ТВП, характерные для Эль-Ниньо — так называемый «язык» положительных аномалий ТПО, проявляющийся также и в аномалиях уровня океана [38]. Более слабые значения

положительных аномалий ТВП распространяются от экватора на север и на юг вдоль побережий Северной и Южной Америки. Достигая высоких широт, аномалии усиливаются и формируют два расположенных симметрично относительно экватора региона положительных аномалий ТВП над Аляской и морями Амундсена и Росса. Более слабые положительные аномалии ТВП распространяются далее в полярные области вплоть до Гренландии и Антарктиды, но величина их при этом мала, а межмодельная изменчивость высока (рис. 2, *b*). Также межмодельная изменчивость велика и на экваторе Тихого океана, что свидетельствует о существенных различиях в воспроизведении моделями CMIP6 характерных для ЭНЮК аномалий ТВП в этом регионе.

На среднемодельном поле ГАО ТВП отрицательные аномалии расположены на западе Тихого океана с двумя очагами в средних широтах его северной и южной частях (рис. 2, *a*). Из этих очагов отрицательные аномалии ТВП распространяются в северную Евразию и в регион южнее Австралии, но величина их при этом мала. Существенные отрицательные аномалии ТВП наблюдаются также в центральной части Северной Америки и к югу от Южной Америки. Таким образом, отрицательные аномалии ТВП частично окружают покрытый преимущественно положительными аномалиями ТВП регион тропиков Индийского и Атлантического океанов, включающий полуостров Индостан, Юго-Восточную Азию, часть Индонезийского архипелага, Австралию, Африку и Аравийский полуостров. Исключением является регион Гималаев и Тибетского плато, где, видимо, вследствие большой высоты над уровнем моря, расположены отрицательные аномалии ТВП.

Из анализа среднего поля разности аномалий температуры воздуха у поверхности между противоположными фазами Эль-Ниньо — Южного колебания по индексу EONI для 50 моделей и поля их среднеквадратических отклонений (рис. 2) следует, что большие по модулю значения аномалий ТВП наблюдаются как над океанами, так и над континентами, но при этом над сушей межмодельная изменчивость в основном выше. Исключениями являются экваториальная область Тихого океана, где развиваются события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, а также акватории Южного и Северного Ледовитого океанов, покрытые льдом большую часть года. Таким образом, пространственная структура ГАО ТВП является более устойчивой над океанами, чем над континентами, что свидетельствует о существенной роли взаимодействия атмосферы и океана в её формировании, и, соответственно, в формировании внетропических дальних связей ЭНЮК.

Рассмотрим глобальную структуру амплитуды колебаний аномалий ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК для выбранных ранее 8 моделей CMIP6 по отдельности (рис. 3) и среднее поле ГАО ДУМ для всех 50 рассматриваемых моделей (рис. 4). В CMIP6 число моделей, воспроизводящих особенности планетарной структуры поля ГАО ДУМ, увеличилось по сравнению с CMIP5 [29]. Глобальная пространственная структура поля ГАО ДУМ обладает симметрией относительно экватора, как и поле ГАО ТВП. Более того, поле ГАО ДУМ обладает симметрией еще и относительно 90° з.д. при учете конфигурации расположения континентов. Следует отметить, что полученное в [39] поле удаленного отклика

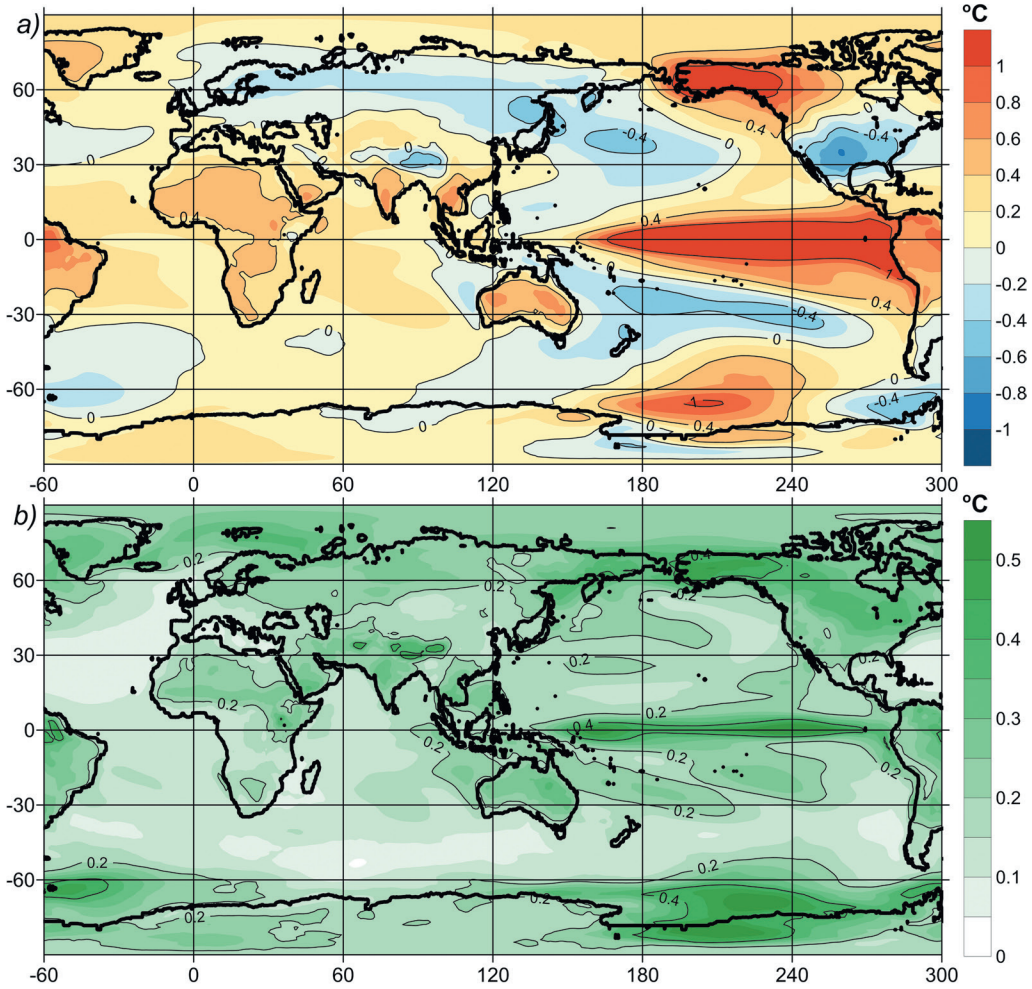

Рис. 2. Среднее поле разности аномалий температуры воздуха у поверхности (ТВП) между противоположными фазами Эль-Ниньо — Южного колебания по индексу EONI для 50 моделей CMIP6 (*a*). Поле среднеквадратических отклонений амплитуд колебаний ТВП между противоположными фазами ЭНЮК для 50 моделей CMIP6 (*b*).

Fig. 2. The average field of the difference in surface air temperature (SAT) anomalies between opposite phases of the El Niño — Southern Oscillation according to the EONI index for 50 CMIP6 models (*a*). Field of standard deviations of SAT oscillation amplitudes between opposite ENSO phases for 50 CMIP6 models (*b*).

аномалий ДУМ на Эль-Ниньо совместной модели атмосферы и океана Института вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН (Institute of Numerical Mathematics — INM) достаточно хорошо совпадает с полем ГАО ДУМ новой версии этой модели — INM-CM5-0 (рис. 3, *f*).

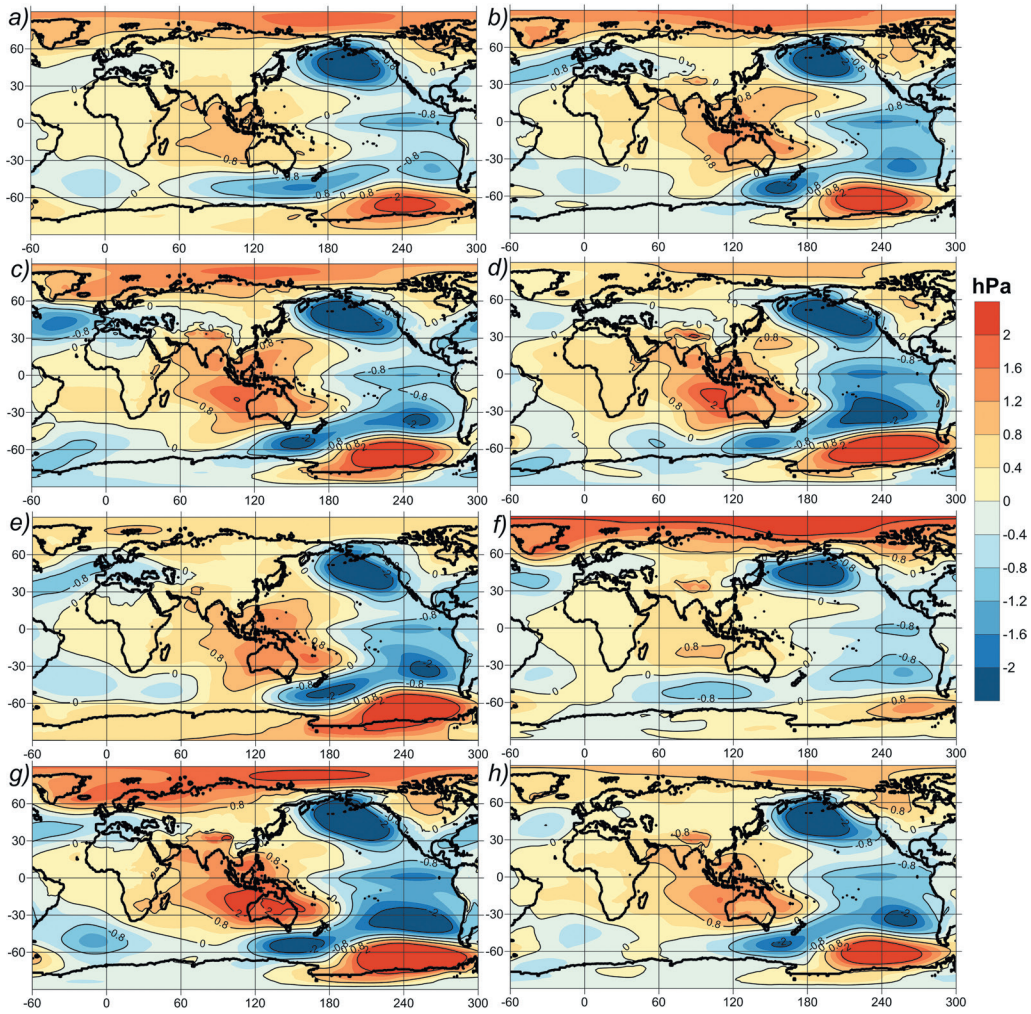

Рис. 3. Поля разности средних аномалий атмосферного давления на уровне моря между противоположными фазами Эль-Ниньо Южного колебания по индексу EONI для моделей: BCC-CSM2-MR (*a*), CNRM-ESM2-1 (*b*), EC-Earth3 (*c*), MIROC6 (*d*), HadGEM3-GC31-MM (*e*), INM-CM5-0 (*f*), NCAR CESM2 (*g*), NOAA GFDL-ESM4 (*h*).

Fig. 3. Fields of the difference in mean anomalies of atmospheric sea level pressure between the opposite phases of El Niño – Southern Oscillation according to the EONI index for the models: BCC-CSM2-MR (*a*), CNRM-ESM2-1 (*b*), EC-Earth3 (*c*), MIROC6 (*d*), HadGEM3-GC31-MM (*e*), INM-CM5-0 (*f*), NCAR CESM2 (*g*), NOAA GFDL-ESM4 (*h*).

Для поля ГАО ДУМ характерна Х-образная структура отрицательных аномалий ДУМ с перекрестием на экваторе Тихого океана в районе 90° з.д. (рис. 3, рис. 4). Из этого перекрестия в четырех направлениях расходятся лучи

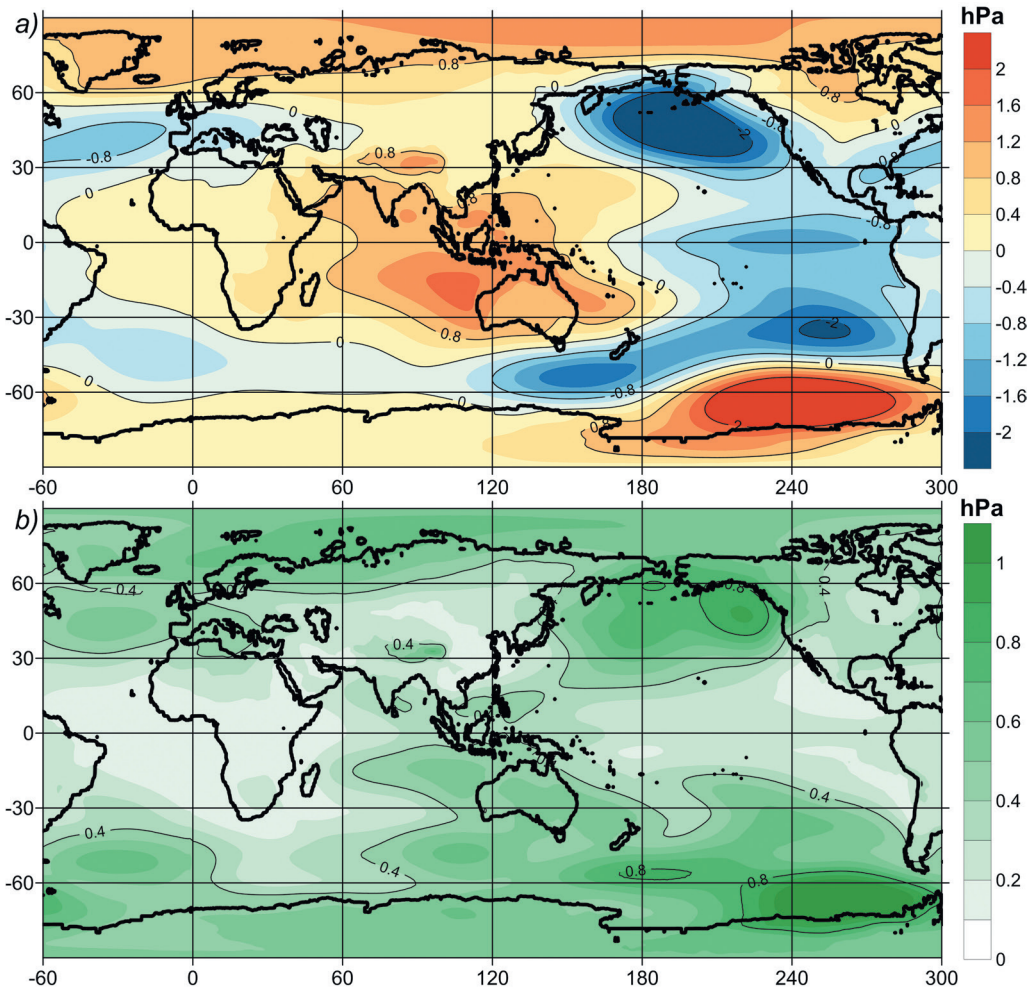

Рис. 4. Среднее поле разности средних аномалий атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) между противоположными фазами Эль-Ниньо — Южного колебания по индексу EONI для 50 моделей CMIP6 (*a*). Поле среднеквадратических отклонений амплитуд колебаний ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК для 50 моделей CMIP6 (*b*).

Fig. 4. The average field of the difference in sea level pressure (SLP) anomalies between opposite phases of the El Niño — Southern Oscillation according to the EONI index for 50 CMIP6 models (*a*). Field of standard deviations of SLP oscillation amplitudes between opposite ENSO phases for 50 CMIP6 models (*b*).

отрицательных аномалий ДУМ: на северо-запад вплоть до Чукотского полуострова, на северо-восток вплоть до Европы, на юго-запад и юго-восток вплоть до Антарктиды. Эти лучи отрицательных аномалий ДУМ охватывают обширный эллипсообразный регион положительных аномалий ДУМ с центром на экваторе

Индийского океана. Следует отметить, что лучи отрицательных аномалий ДУМ замыкаются только в Южном полушарии, и это замыкание происходит над океаном. В Северном полушарии между лучами отрицательных аномалий ДУМ существует разрыв над Азиатским континентом. По-видимому, данная особенность связана с важной ролью взаимодействия атмосферы и океана при формировании глобальной структуры поля ГАО ДУМ.

В высоких широтах к северу и югу от перекрестия (0° ш., 90° з.д.) лучей отрицательных аномалий ДУМ находятся очаги сильных положительных аномалий ДУМ, из которых эти аномалии распространяются в Арктику и Антарктику. При большой величине аномалий ДУМ в высоких широтах их межмодельная изменчивость также весьма велика (рис. 4, *b*). Самая низкая межмодельная изменчивость наблюдается над океанами в тропиках, что дополнительно свидетельствует о важности процессов взаимодействия атмосферы и океана в формировании пространственной структуры поля ГАО ДУМ и дальних связях ЭНЮК.

Обращает на себя внимание то, что из 50 рассмотренных моделей CMIP6 лучше воспроизводят пространственную структуру ГАО ДУМ те модели, которые также хорошо воспроизводят пространственную структуру ГАО ТВП. Таким образом, можно сделать вывод, что планетарные пространственные структуры полей ГАО ТВП и ГАО ДУМ взаимосвязаны. И модели, воспроизводящие планетарные пространственные структуры полей ГАО ТВП и ГАО ДУМ, хорошо описывают дальние связи ЭНЮК. Благодаря этому данные модели с более высокой точностью могут также воспроизводить дальние связи ЭНЮК и с другими гидрометеорологическими параметрами, такими как: температура океана на различных глубинах [26], осадки, ветер и влажность воздуха [27]. Но анализ воспроизведения моделями CMIP6 дальних связей ЭНЮК с этими и другими отличными от ТВП и ДУМ гидрометеорологическими параметрами требует отдельного исследования.

Чтобы оценить наличие в моделях CMIP6 дальних связей ЭНЮК с гидрометеорологическими параметрами вне тропиков Тихого океана применен метод асинхронного взаимного корреляционного анализа между EONI и тремя определенными в разделе «Методика исследования» индексами ГАО — GAO1, GAO2 и EGAO (табл. 2).

В таблице 2 представлены средние периоды колебаний между противоположными фазами индексов GAO1, GAO2 и EGAO. Метод определения этих фаз описан в разделе «Методика исследования». Средний период колебания вычислялся как удвоенное число лет эксперимента, деленное на общее количество положительных и отрицательных фаз данного индекса. Среднемодельными периодами колебаний оказались: GAO1 — 3,96 года, GAO2 — 4,39 года, EGAO — 4,81 года (таблица 2, столбцы 2, 5 и 8).

Среднемодельные периоды индексов ГАО оказались близки к среднемодельному периоду индекса ЭНЮК (4,68 года). При этом средний период индекса GAO1 меньше периода индекса GAO2, который, в свою очередь, меньше периода индекса EGAO. Из этого следует, что исключение тропической части из ГАО увеличивает средний период колебания оставшейся части ГАО.

Таблица 2

Связи индексов ГАО и EONI исследуемых моделей CMIP6

Links between GAO indices and EONI of the studied CMIP6 models

Название модели	Сред. период колебания GAO1 (годы)	Макс. корреляция GAO1 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO1 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания GAO2 (годы)	Макс. корреляция GAO2 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO2 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания EGAO (годы)	Макс. корреляция EGAO и EONI	Сдвиг при макс. корр. EGAO и EONI (месяцы)
AS-RCEC TaiESM1	3,92	0,77	0	4,22	0,60	0	4,59	0,44	3
AWI-CM-1-1-MR	4,27	0,63	0	4,22	0,42	1	4,88	0,29	1
BCC-CSM2-MR	3,77	0,69	1	4,17	0,50	2	4,71	0,30	1
BCC-ESM1	3,94	0,60	0	4,70	0,38	0	4,96	0,24	1
CAMS-CSM1-0	3,75	0,71	0	4,31	0,47	0	5,08	0,41	0
CAS-ESM2-0	3,77	0,75	0	4,25	0,59	0	4,78	0,38	1
CAS FGOALS-f3-L	3,57	0,80	1	4,11	0,58	1	4,37	0,51	1
CAS FGOALS-g3	3,48	0,76	1	3,97	0,59	1	4,22	0,44	1
CanESM5	3,97	0,67	–1	4,27	0,50	–1	5,14	0,29	–1
CanESM5-CanOE	4,17	0,68	–1	4,53	0,51	–1	4,86	0,28	0
CMCC-CM2-SR5	4,24	0,73	0	4,27	0,61	1	5,10	0,39	3
CMCC-ESM2	3,94	0,81	1	3,98	**0,70**	1	4,13	0,51	2
CNRM-CM6-1	3,80	0,67	0	4,69	0,39	–1	4,88	0,26	–1
CNRM-CM6-1-HR	4,26	0,64	0	4,76	0,33	–1	5,04	0,18	0
CNRM-ESM2-1	3,80	0,69	0	4,78	0,42	0	5,29	0,29	0
CSIRO ACCESS-CM2	3,53	0,74	0	4,12	0,49	–1	4,42	0,39	0
ACCESS-ESM1-5	3,85	0,68	0	4,05	0,45	1	4,80	0,27	0
E3SM-1-0	**4,59**	0,64	0	5,32	0,42	0	5,29	0,26	3
EC-Earth3	4,39	0,65	0	4,89	0,41	1	4,73	0,23	0
EC-Earth3-AerChem	4,35	0,57	–1	**5,71**	0,29	0	5,71	0,17	0
EC-Earth3-Veg	4,13	0,67	0	4,93	0,42	1	5,32	0,27	0
EC-Earth3-Veg-LR	3,93	0,62	0	4,66	0,35	1	5,09	0,23	1
FIO-ESM-2-0	4,23	0,72	1	4,37	0,55	1	5,25	0,34	3
MPI-ESM-1-2-HAM	4,25	0,60	0	4,42	0,41	1	4,44	0,31	0
INM-CM4-8	4,48	**0,46**	0	4,64	**0,27**	1	5,65	**0,14**	1
INM-CM5-0	4,42	0,47	0	4,80	**0,27**	0	5,01	0,16	0
IPSL-CM6A-LR	3,85	0,67	0	4,35	0,50	1	5,06	0,26	1
KIOST-ESM	3,82	0,75	0	4,52	0,50	0	4,48	0,41	0
MIROC-ES2L	4,13	0,79	0	4,13	0,52	1	4,67	0,37	2
MIROC6	4,21	0,78	0	4,40	0,58	0	5,03	0,37	0
HadGEM3-GC31-LL	3,60	0,72	0	4,50	0,51	0	4,59	0,36	1
HadGEM3-GC31-MM	3,55	0,75	0	4,27	0,48	0	4,76	0,36	0
MPI-ESM1-2-HR	4,50	0,66	–1	4,78	0,43	0	4,65	0,31	–1
MPI-ESM1-2-LR	4,18	0,68	0	4,30	0,47	0	4,55	0,37	0
MRI-ESM2-0	3,89	0,73	0	4,42	0,48	0	4,61	0,30	1

Окончание табл. 2

Название модели	Сред. период колебания GAO1 (годы)	Макс. корреляция GAO1 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO1 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания GAO2 (годы)	Макс. корреляция GAO2 и EONI	Сдвиг при макс. корр. GAO2 и EONI (месяцы)	Сред. период колебания EGAO (годы)	Макс. корреляция EGAO и EONI	Сдвиг при макс. корр. EGAO и EONI (месяцы)
NASA GISS-E2-1-G	**3,44**	0,77	–1	4,15	0,52	–3	4,27	0,48	–1
NASA GISS-E2-1-H	4,16	0,72	–1	4,89	0,43	0	4,83	0,42	0
NCAR CESM2	3,90	0,77	0	4,00	0,60	0	4,65	0,43	1
NCAR CESM2-FV2	3,66	0,78	1	3,85	0,61	1	4,03	0,51	3
CESM2-WACCM	4,04	0,73	0	4,25	0,55	0	4,97	0,38	2
CESM2-WACCM-FV2	3,47	**0,81**	1	**3,40**	0,66	1	**3,68**	**0,56**	3
NCC NorCPM1	3,75	0,78	1	3,89	0,64	1	3,85	0,51	2
NCC NorESM2-LM	3,88	0,78	1	4,01	0,59	1	4,64	0,45	1
NCC NorESM2-MM	3,69	0,77	1	4,12	0,58	1	4,74	0,41	1
NOAA GFDL-CM4	3,73	0,70	0	4,10	0,48	0	5,13	0,30	0
NOAA GFDL-ESM4	3,95	0,75	0	4,37	0,56	0	5,65	0,36	0
NUIST NESM3	4,39	0,66	–1	4,81	0,43	–1	**5,71**	0,33	–1
SAM0-UNICON	3,86	0,68	0	4,07	0,52	1	4,64	0,33	2
THU CIESM	4,15	0,71	0	4,41	0,50	1	4,72	0,37	3
UA MCM-UA-1-0	3,58	0,70	0	4,46	0,48	0	4,78	0,39	–1
Минимум	**3,44**	**0,46**	**–1**	**3,40**	**0,27**	**–3**	**3,68**	**0,14**	**–1**
Максимум	**4,59**	**0,81**	**1**	**5,71**	**0,70**	**2**	**5,71**	**0,56**	**3**
Среднее	**3,96**	**0,70**	**0,1**	**4,39**	**0,49**	**0,3**	**4,81**	**0,35**	**0,8**

Взаимные корреляции между EONI и индексами ГАО рассчитывались с шагом в 1 месяц со сдвигами от −60 до +60 месяцев. Найдены максимальные по модулю значения корреляций (таблица 2, столбцы 3, 6 и 9) и сдвиги, которым они соответствовали. Если указанный в таблице 2 (столбцы 4, 7 и 10) сдвиг максимальной корреляции положительный, это означает, что EONI опережает индекс ГАО, если отрицательный — значит EONI запаздывает относительно индекса ГАО. Практически все модели демонстрируют высокие корреляции между EONI и GAO1 — среднемодельная корреляция равняется 0,7. Это соответствует ожидаемому, поскольку GAO1 включает в себя регионы в тропиках Тихого океана, в которых по разности аномалий ДУМ вычисляется экваториальный индекс Южного колебания (Equatorial Southern Oscillation Index).

Для индекса GAO2 с исключёнными тропиками Тихого океана значения корреляций между ним и EONI меньше, чем между GAO1 и EONI. Среднемодельная корреляция равняется 0,49. Для индекса же EGAO, из которого исключен весь тропический пояс Земли, значения корреляций между ним и EONI становятся еще меньше по сравнению с предыдущими индексами и среднемодельная корреляция равняется 0,35. Таким образом, после того, как из ГАО были удалены низкие широты, величина связей ее оставшейся части с ЭНЮК уменьшилась.

Помимо планетарной структуры дальних связей, ЭНЮК характеризуется временной динамикой свойственной странному нехаотическому аттрактору (СНА) [32]. При СНА на нелинейную динамическую систему воздействуют две или более внешние квазипериодические силы с несоизмеримыми частотами колебаний — соотношение их периодов очень плохо аппроксимируется рациональными числами. Одним из примеров такого соотношения периодов является золотое сечение и его линейные преобразования. Из-за несоизмеримости этих периодов внешние силы воздействуют на систему как бы невпопад, и ее поведение кажется случайным, хотя на самом деле является нехаотическим. Спектральные оценки характеристик (индексов) такой системы демонстрируют пики на частотах, являющихся всевозможными комбинациями периодов внешних сил, воздействующих на систему. Благодаря этому такие спектры кажутся непрерывными, хотя они состоят из счетного числа пиков, между которыми существуют частоты с нулевыми энергиями колебаний.

Энергетические спектры EONI моделей CMIP6 и средний спектр по рассматриваемым 50 моделям отличаются от спектров СНА. На среднемодельном спектре EONI отсутствуют явно выраженные пики. При этом наблюдается повышение энергии колебаний от периода 2 года до периода приблизительно 4 года. Затем энергия колебаний начинает понижаться вплоть до периода приблизительно 20 лет, после чего это снижение замедляется. При этом наблюдается сильная межмодельная изменчивость спектров EONI.

На полученных ранее [32] спектрах индексов ЭНЮК и ГАО присутствуют пики на периодах супер- и субгармоник следующих внешних сил, воздействующих на глобальную климатическую систему: чандлеровское колебание полюсов Земли (период ~1,2 года), изменения солнечной активности (период ~11,2 лет) и лунно-солнечная нутация оси вращения Земли (период ~18,6 года). Форсинг данных внешних сил отсутствует в эксперименте piControl, и поэтому ярко выраженных пиков с указанными периодами на среднемодельном спектре CMIP6 не наблюдается.

Заключение

Рассмотренные 50 моделей CMIP6 имеют заметные различия между собой в следующих основных характеристиках Эль-Ниньо — Южного колебания (ЭНЮК): стандартное отклонение индекса ЭНЮК, его минимальное и максимальное значения, средний временной период между событиями, а также средняя продолжительность событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Некоторые из моделей CMIP6 воспроизводят основные характеристики ЭНЮК и асимметрию между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья с существенными отличиями от наблюдаемых по данным инструментальных измерений. Исходя из этого, можно заключить, что далеко не все модели CMIP6 воспроизводят ЭНЮК с высокой точностью.

Часть моделей CMIP6 довольно хорошо воспроизводит глобальную структуру поля амплитуды колебаний аномалий температуры воздуха у поверхности и атмосферного давления на уровне моря между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья,

симметричную относительно экватора с учетом расположения континентов. Причем, по сравнению с моделями CMIP5, число моделей в CMIP6, воспроизводящих глобальную структуру амплитуды колебаний аномалий ТВП и ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК, увеличилось. Таким образом, можно сделать вывод, что в моделях CMIP6 улучшилось описание дальних связей между ЭНЮК и исследуемыми метеорологическими полями вне тропиков Тихого океана по сравнению с моделями CMIP5.

Среднемодельные поля CMIP6 амплитуды колебаний аномалий ТВП и ДУМ между событиями Эль-Ниньо и Ла-Нинья во многих деталях повторяют поля Глобальной атмосферной осцилляции, полученные ранее по данным измерений и реанализам. Межмодельная изменчивость полей оказалась выше над континентами, чем над океанами, что свидетельствует о существенной роли взаимодействия атмосферы и океана в формировании дальних связей ЭНЮК с исследуемыми метеорологическими полями вне тропиков Тихого океана.

Часть моделей CMIP6 демонстрирует высокие корреляции между ЭНЮК и аномалиями ДУМ вне тропиков Тихого океана. При этом наблюдаются существенные различия между рассмотренными 50 моделями CMIP6 в величинах корреляций, оценивающих внетропические дальние связи ЭНЮК.

Оценки энергетических спектров индекса ЭНЮК, полученных по моделям CMIP6, отличаются между собой, а также от спектров, полученных ранее по данным наблюдений, где фиксировались пики на периодах супер- и субгармоник внешних сил, воздействующих на климатическую систему. Таким образом, временная динамика ЭНЮК имеет существенные различия между моделями CMIP6, а также отличается от наблюдаемой по данным измерений. Причиной этого может являться то, что в эксперименте piControl, за исключением годового хода поступления тепла от Солнца, отсутствует воздействие других квазипериодических внешних сил, влияющих на глобальную климатическую систему.

Список литературы

1. McPhaden M. J., Santoso A., Cai W. et al. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Philander S. G. H. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, 1990: 289 p.
3. Johnson N. C., Wittenberg A. T., Rosati A. J. et al. Future changes in boreal winter ENSO teleconnections in a large ensemble of high-resolution climate simulations // Front. Clim. 2022. Vol. 4. 941055.
4. McGregor S., Cassou C., Kosaka Y., Phillips A. S. Projected ENSO teleconnection changes in CMIP6 // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49. e2021GL097511.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Dev. 2016. Vol. 9. P. 1937—1958.
6. Fredriksen H. B., Berner J., Subramanian A. C., Capotondi A. How does El Niño–Southern Oscillation change under global warming — A first look at CMIP6 // Geophysical Research Letters. 2020. Vol. 47. e2020GL090640.
7. Beobide-Arsuaga G., Bayr T., Reintges A. et al. Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models // Clim. Dyn. 2021. Vol. 56. P. 3875—3888.
8. Xie X., Zhou S., Zhang J., Huang, P. The Role of Background SST Changes in the ENSO-Driven Rainfall Variability Revealed from the Atmospheric Model Experiments in CMIP5/6 // Atmos. Res. 2021. Vol. 261. 105732.

9. Dieppois B., Capotondi A., Pohl B. et al. ENSO diversity shows robust decadal variations that must be captured for accurate future projections // Commun Earth Environ. 2021. Vol. 2. 212.
10. Zhao Y., Sun D. ENSO Asymmetry in CMIP6 Models // J. Climate. 2022. Vol. 35. P. 5555—5572.
11. Hou M., Tang Y. Recent progress in simulating two types of ENSO — from CMIP5 to CMIP6 // Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. 986780.
12. Liao H., Wang C., Song Z. ENSO phase-locking biases from the CMIP5 to CMIP6 models and a possible explanation // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2021. Vol. 189—190. 104943.
13. Chen H., Jin F. Simulations of ENSO Phase-Locking in CMIP5 and CMIP6 // J. Climate. 2021. Vol. 34. P. 5135—5149.
14. Chen H.-C., Jin F.-F. Dynamics of ENSO phase-locking and its biases in climate models // Geophysical Research Letters. 2022. Vol. 49. e2021GL097603.
15. Brown J. R., Brierley C. M., An S. I. et al. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models // Climate of the Past. 2020. Vol. 16. P. 1777—1805.
16. McKenna S., Santoso A., Gupta A. S. et al. Indian Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO // Sci. Rep. 2020. Vol. 10. 11500.
17. Song G., Ren R. The Subsurface and Surface Indian Ocean Dipoles and Their Association with ENSO in CMIP6 models // Adv. Atmos. Sci. 2023. Vol. 40. P. 975—987.
18. Wang X. Y., Zhu J., Chang C. H. et al. Underestimated responses of Walker circulation to ENSO-related SST anomaly in atmospheric and coupled models // Geosci. Lett. 2021. Vol. 8. 17.
19. Chakravorty S., Perez R. C., Anderson B. T. et al. Testing the Trade Wind Charging Mechanism and Its Influence on ENSO Variability // J. Climate. 2020. Vol. 33. P. 7391—7411.
20. Pivotti V., Anderson B. T., Cherchi A. et al. North Pacific trade wind precursors to ENSO in the CMIP6 HighResMIP multimodel ensemble // Clim. Dyn. 2023. Vol. 60. P. 2501—2516.
21. Jian Y., Leung M. Y. T., Zhou W. et al. Present and Future Relations between ENSO and Winter Synoptic Temperature Variability over the Asian–Pacific–American Region Simulated by CMIP5/6 // J. Climate. 2021. Vol. 34. P. 9899—9913.
22. Hu J., Shen Y., Deng J. et al. Revisiting the Influence of ENSO on the Arctic Stratosphere in CMIP5 and CMIP6 Models // Atmosphere. 2023. Vol. 14. 785.
23. Коленникова М. А., Варгин П. Н., Гущина Д. Ю. Влияние Эль-Ниньо на стратосферу Арктики по данным моделей CMIP5 и реанализа // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 5—23.
24. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А., Серых И. В. Эль-Ниньо как следствие Глобальной атмосферной осцилляции в динамике климатической системы Земли // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446. № 1. С. 89—94.
25. Бышев В. И., Нейман В. Г., Романов Ю. А. и др. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179—185.
26. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Interrelations between temperature variations in oceanic depths and the Global atmospheric oscillation // Pure and Applied Geophysics. 2020. Vol. 177. P. 5951—5967.
27. Серых И. В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329–370.
28. Серых И. В., Сонечкин Д. М. Взаимосвязь Эль-Ниньо — Южного колебания и Южной кольцевой моды как элементов Глобальной атмосферной осцилляции // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2022. Т. 67. № 4. С. 614—630.
29. Серых И. В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 1. С. 14—28.
30. Planton Y. Y., Guilyardi E., Wittenberg A. T. et al. Evaluating Climate Models with the CLIVAR 2020 ENSO Metrics Package // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2021. Vol. 102. E193—E217.
31. Fasullo J. T., Phillips A. S., Deser C. Evaluation of Leading Modes of Climate Variability in the CMIP Archives // J. Climate. 2020. Vol. 33. P. 5527—5545.
32. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin // Theoretical and Applied Climatology. 2019. Vol. 137. P. 2639—2656.
33. Матвеева Т. А., Гущина Д. Ю. Изменения характеристик центрально-тихоокеанского и восточно-тихоокеанского Эль-Ниньо в условиях потепления климата (по результатам экспериментов

RCP 2.6 и RCP 8.5 CMIP5) // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 86—110.
34. Serykh I. V., Sonechkin D. M., Byshev V. I. et al. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections // Pure and Applied Geophysics. 2019. Vol. 176. P. 3737—3755.
35. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms // IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. AU-15 (2). P. 70—73.
36. Capotondi A., Wittenberg A. T., Newman M. et al. Understanding ENSO diversity // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2015. Vol. 96. P. 921—938.
37. NOAA Climate Prediction Center, Cold & Warm Episodes by Season. Available at: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (accessed on: 31.07.2023).
38. Малинин В. Н., Смирнов М. А. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание // Гидрометеорология и экология. 2022. № 68. С. 463—477.
39. Володин Е. М., Дианский Н. А. Воспроизведение Эль-Ниньо в совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана // Метеорологии и Гидрологии. 2004. №12. С. 5—14.

References

1. McPhaden M. J., Santoso A., Cai W. et al. El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Philander S. G. H. El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press, 1990: 289 p.
3. Johnson N. C., Wittenberg A. T., Rosati A. J. et al. Future changes in boreal winter ENSO teleconnections in a large ensemble of high-resolution climate simulations. *Front. Clim.* 2022; (4): 941055.
4. McGregor S., Cassou C., Kosaka Y., Phillips A. S. Projected ENSO teleconnection changes in CMIP6. *Geophysical Research Letters.* 2022; (49): e2021GL097511.
5. Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 2016; (9): 1937—1958.
6. Fredriksen H. B., Berner J., Subramanian A. C., Capotondi A. How does El Niño–Southern Oscillation change under global warming — A first look at CMIP6. *Geophysical Research Letters*. 2020; (47): e2020GL090640.
7. Beobide-Arsuaga G., Bayr T., Reintges A. et al. Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models. *Clim. Dyn.* 2021;(56): 3875—3888.
8. Xie X., Zhou S., Zhang J., Huang, P. The Role of Background SST Changes in the ENSO-Driven Rainfall Variability Revealed from the Atmospheric Model Experiments in CMIP5/6. *Atmos. Res.* 2021;(261): 105732.
9. Dieppois B., Capotondi A., Pohl B. et al. ENSO diversity shows robust decadal variations that must be captured for accurate future projections. *Commun Earth Environ.* 2021;(2): 212.
10. Zhao Y., Sun D. ENSO Asymmetry in CMIP6 Models. *J. Climate*. 2022; (35): 5555—5572.
11. Hou M., Tang Y. Recent progress in simulating two types of ENSO – from CMIP5 to CMIP6. *Frontiers in Marine Science*. 2022;(9): 986780.
12. Liao H., Wang C., Song Z. ENSO phase-locking biases from the CMIP5 to CMIP6 models and a possible explanation. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2021;(189—190): 104943.
13. Chen H., Jin F. Simulations of ENSO Phase-Locking in CMIP5 and CMIP6. *J. Climate*. 2021;(34): 5135—5149.
14. Chen H.-C., Jin F.-F. Dynamics of ENSO phase-locking and its biases in climate models. *Geophysical Research Letters*. 2022;(49): e2021GL097603.
15. Brown J. R., Brierley C. M., An S. I. et al. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models. *Climate of the Past*. 2020;(16): 1777—1805.
16. McKenna S., Santoso A., Gupta A. S. et al. Indian Ocean Dipole in CMIP5 and CMIP6: characteristics, biases, and links to ENSO. *Sci. Rep.* 2020;(10): 11500.
17. Song G., Ren R. The Subsurface and Surface Indian Ocean Dipoles and Their Association with ENSO in CMIP6 models. *Adv. Atmos. Sci*. 2023;(40): 975—987.

18. Wang X. Y., Zhu J., Chang C. H. et al. Underestimated responses of Walker circulation to ENSO-related SST anomaly in atmospheric and coupled models. *Geosci. Lett*. 2021;(8): 17.
19. Chakravorty S., Perez R. C., Anderson B. T. et al. Testing the Trade Wind Charging Mechanism and Its Influence on ENSO Variability. *J. Climate*. 2020;(33): 7391—7411.
20. Pivotti V., Anderson B. T., Cherchi A. et al. North Pacific trade wind precursors to ENSO in the CMIP6 HighResMIP multimodel ensemble. *Clim. Dyn*. 2023;(60): 2501—2516.
21. Jian Y., Leung M. Y. T., Zhou W. et al. Present and Future Relations between ENSO and Winter Synoptic Temperature Variability over the Asian–Pacific–American Region Simulated by CMIP5/6. *J. Climate*. 2021;(34): 9899—9913.
22. Hu J., Shen Y., Deng J., et al. Revisiting the Influence of ENSO on the Arctic Stratosphere in CMIP5 and CMIP6 Models. *Atmosphere*. 2023;(14): 785.
23. Kolennikova M. A., Gushchina D. Y., Vargin P. N. Interrelations between El Niño indices and major characteristics of polar stratosphere according to cmip5 models and reanalysis. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2021;(46): (351—364). (In Russ.)
24. Byshev V. I., Neiman V. G., Romanov Y. A., Serykh I. V. El Niño as a consequence of the global oscillation in the dynamics of the earth's climatic system. *Doklady Akademii nauk = Doklady Earth Sciences*. 2012;(446): (1089—1094).
25. Byshev V. I., Neiman V. G., Romanov Y. A. et al. Statistical significance and climatic role of the Global Atmospheric Oscillation. *Okeanologiya = Oceanology*. 2016;(56): (165—171).
26. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Interrelations between temperature variations in oceanic depths and the Global atmospheric oscillation. *Pure and Applied Geophysics*. 2020;(177): 5951—5967.
27. Serykh I. V. On the role of El Niño — Global Atmospheric Oscillation in the interannual variability of hydrometeorological processes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021;(63): (329—370). (In Russ.).
28. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Link of El Niño — Southern Oscillation and Southern Annular Mode as elements of Global Atmospheric Oscillation. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences.* 2022:(67): (614—630). (In Russ.).
29. Serykh I. V. On the dynamics and structure of the Global atmospheric oscillation in climate models and reality. *Okeanologicheskiye issledovaniya = Journal of Oceanological Research*. 2018:(46): (14—28). (In Russ.).
30. Planton Y. Y., Guilyardi E., Wittenberg A. T. et al. Evaluating Climate Models with the CLIVAR 2020 ENSO Metrics Package. *Bull. Amer. Meteor. Soc*. 2021;(102): 193—217.
31. Fasullo J. T., Phillips A. S., Deser C. Evaluation of Leading Modes of Climate Variability in the CMIP Archives. *J. Climate*. 2020;(33): 5527—5545.
32. Serykh I. V., Sonechkin D. M. Nonchaotic and globally synchronized short-term climatic variations and their origin. *Theoretical and Applied Climatology*. 2019;(137): 2639—2656.
33. Matveeva T. A., Gushchina D. Y. Changes in the characteristics of the central pacific and eastern pacific El Niño under global climate warming (results of RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios of CMIP5). *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology.* 2017;(2): (86—110). (In Russ.).
34. Serykh I. V., Sonechkin D. M., Byshev V. I. et al. Global Atmospheric Oscillation: An Integrity of ENSO and Extratropical Teleconnections. *Pure and Applied Geophysics*. 2019;(176): 3737—3755.
35. Welch P. D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967;(15): 70—73.
36. Capotondi A., Wittenberg A. T., Newman M. et al. Understanding ENSO diversity. *Bull. Amer. Meteor. Soc*. 2015;(96): 921—938.
37. NOAA Climate Prediction Center, Cold & Warm Episodes by Season. Available at: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php (accessed on: 31.07.2023).
38. Malinin V. N., Smirnov M. A. Sea level variability in the ENSO region of the Pacific Ocean. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2022;(68):(463—477). (In Russ.).
39. Volodin E. M., Diansky N. A. El-Nino reproduction in coupled general circulation model of atmosphere and ocean. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology.* 2004;(12): (5—14). (In Russ.).

Информация об авторах

Илья Викторович Серых, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Физическое направление, Лаборатория крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей, iserykh@ocean.ru.

Дмитрий Михайлович Сонечкин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Физическое направление, Лаборатория взаимодействия океана с водами суши и антропогенных процессов, dsonech@yandex.ru.

Information about authors

Ilya V. Serykh, PhD in Physics and Mathematics, Senior Researcher, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Department of Physics, Laboratory of Large-Scale Variability of Hydrophysical Fields.

Dmitry M. Sonechkin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Shirshov Institute of Oceanology RAS, Department of Physics, Laboratory of Ocean-Land Water Interaction and Anthropogenic Processes.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 28.08.2023
Принята к печати 01.11.2023

The article was received on 28.08.2023
The article was accepted 01.11.2023