

ОКЕАНОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 551.509:[551.465.7+551.513]:004.94

doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-474-506

Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо — Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе Глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей СМIP6

Илья Викторович Серых

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

Аннотация. Произведен анализ результатов экспериментов piControl и Historical климатических моделей Земной системы, участвующих в шестом этапе Проекта взаимного сравнения совместных моделей (СМIP6), на предмет их способности заблаговременно прогнозировать Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК). С помощью метода главных компонент показано, что Глобальная атмосферная осцилляция (ГАО), элементом которой является ЭНЮК, является главной модой межгодовых колебаний планетарных аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и атмосферного давления на уровне моря (ДУМ) у большинства моделей СМIP6. Найдены те модели СМIP6, которые воспроизводят западно-восточное распространение ГАО, при этом Эль-Ниньо и Ла-Нинья являются фазами данного процесса, благодаря чему эти события можно прогнозировать примерно с годовой заблаговременностью.

Ключевые слова: Эль-Ниньо — Южное колебание, модели СМIP6, прогноз Эль-Ниньо и Ла-Нинья, Глобальная атмосферная осцилляция, индекс-предиктор, главные компоненты.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2024-0017 «Долгопериодная эволюция океанской циркуляции и потоков на границе океан-атмосфера и роль океана в формировании климата».

Для цитирования: Серых И. В. Оценка возможности прогноза Эль-Ниньо — Южного колебания с годовой заблаговременностью на основе Глобальной атмосферной осцилляции по результатам моделей СМIP6 // Гидрометеорология и экология. 2024. № 76. С. 474—506. doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-474-506.

Original article

Assessing the forecast capability of the El Niño–Southern Oscillation with a one-year lead-time using the Global Atmospheric Oscillation based on the results of CMIP6 models

Ilya V. Serykh

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

Summary. Based on the results of the piControl and Historical experiments of CMIP6 models participating in the sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), the fields of the 1st and 2nd principal components of the interannual global variability of surface air temperature (SAT) and atmospheric sea level pressure (SLP) anomalies were constructed, and the connections between them were investigated. It turned out that the 1st principal components of the studied models are associated with the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), and the 2nd with the Global Atmospheric Oscillation (GAO) phase, which is several months ahead of El Niño events. Therefore, it was shown that GAO, of which ENSO is an element, is the main mode of interannual planetary variability of SAT and SLP anomalies in most CMIP6 models.

The degrees of connections between EOF1 and EOF2 of the interannual global variability of SAT and SLP anomalies with the ENSO and GAO indices were assessed. CMIP6 models have been identified that have strong connections between EOF1 and ONI and GAO indexes. We also found those CMIP6 models whose combined EOF2 have strong relationships with the ENSO's predictor index (PGAO), which can be used to predict El Niño and La Niña events based on the west-east propagation of the GAO spatial structure.

Based on the analysis of the identified connections between EOF1, EOF2, ONI and PGOA, the following CMIP6 models were selected, that reproduce the west-east spread of the GAO, with El Niño and La Niña being phases of this process, thanks to which these events can be predicted with approximately a year's lead-time, thereby overcoming the so-called spring predictability barrier of ENSO: AS-RCEC TaiESM1, CAMS CAMS-CSM1-0, CMCC CMCC-ESM2, CAS FGOALS-f3-L, FIO-QLNM FIO-ESM-2-0, MIROC MIROC6, MOHC HadGEM3-GC31-LL, MRI MRI-ESM2-0, NCAR CESM2-FV2, NCC NorESM2-LM, NOAA GFDL-ESM4, NUIST NESM3, SNU SAM0-UNICON, THU CIESM.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the state assignment of the P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences on topic No. FMWE-2024-0017 “Long-term evolution of ocean circulation and flows at the ocean-atmosphere boundary and the role of the ocean in climate formation”.

Keywords: El Niño – Southern Oscillation, CMIP6 models, El Niño and La Niña forecast, Global Atmospheric Oscillation, predictor index, principal components.

For citation: Serykh I. V. Assessing the forecast capability of the El Niño–Southern Oscillation with a one-year lead-time using the Global Atmospheric Oscillation based on the results of CMIP6 models. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(76):474–506. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2024-76-474-506.

Введение

Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК) является сильнейшим межгодовым сигналом в глобальной климатической системе и ведущим источником сезонных прогнозов климата во всем мире [1]. Для прогноза ЭНЮК применяются динамические и статистические модели, которые позволяют оценить предсказуемость

и точность его прогнозирования, меняющиеся в зависимости от сезона [2, 3] и от десятилетия к десятилетию [4]. Междесятилетние изменения предсказуемости ЭНЮК в значительной степени связаны с медленно меняющимися условиями в океане, при этом краткосрочные атмосферные колебания часто ограничивают предсказуемость ЭНЮК в сезонных временных масштабах. Несмотря на постоянно совершенствующиеся модели и схемы их инициализации, качество предсказания ЭНЮК остается низким для прогнозов, проходящих через так называемый весенний барьер предсказуемости (spring predictability barrier — SPB) [5—8], поэтому считается, что система прогнозирования ЭНЮК, основанная исключительно на физических процессах Тихоокеанского бассейна, имеет ограничение менее одного года [9].

В [10, 11] разработана иерархия схем прогнозирования ЭНЮК, которая включает статистические схемы и физические модели. Статистические схемы, как правило, основаны на линейных статистических методах и могут быть разделены на модели, в которых в качестве предикторов используются низкочастотные колебания либо атмосферы (давление на уровне моря или приземный ветер), либо океана (температура поверхности или теплосодержание верхних слоев океана). Физические модели состоят из связанных моделей атмосферы и океана различной степени сложности, начиная от упрощенных моделей типа «мелкой воды» и заканчивая совместными моделями общей циркуляции.

С развитием совместных моделей, усовершенствованием схем инициализации и новыми теоретическими исследованиями достигнут определенный прогресс в прогнозировании ЭНЮК на временных масштабах от месяцев до сезонов [12]. При этом существуют два фундаментальных направления: совершенствование практических навыков прогнозирования и теоретическое изучение внутреннего предела предсказуемости. Первое включает в себя прогресс в совместных моделях, ассимиляции данных, ансамблевом прогнозировании и т. д., а второе фокусируется на усилиях по изучению оптимального роста ошибки и оценке внутреннего предела предсказуемости ЭНЮК. Но, несмотря на этот прогресс и существование целого ряда моделей, прогнозирующих динамику ЭНЮК, прогноз этого явления не всегда бывает успешен.

К атмосферным процессам важным для прогноза ЭНЮК относятся компоненты внутрисезонной тропической изменчивости — колебание Маддена-Джулиана и атмосферные экваториальные волны Россби [13]. Аномалии тихоокеанской атмосферной циркуляции в зимне-весенний период могут оказывать долгосрочное влияние на тропический климат следующего лета посредством передачи сигнала через температуру поверхности океана (ТПО). В [14] предложен индекс, основанный на данных о давлении на уровне моря (ДУМ) с февраля по март в области, окружающей Гавайи, и показано, что эта область является наиболее информативной частью более крупной структуры ДУМ, оказывающей отложенное воздействие на ЭНЮК посредством передачи сигнала через ТПО.

Тихоокеанская меридиональная мода (Pacific meridional mode — PMM) является ведущей модой взаимодействия океана и атмосферы в субтропиках северо-восточной части Тихого океана и играет важную роль в возникновении

ЭНЮК. В исследовании [15] рассмотрены характеристики моделей пятого и шестого этапов Проекта взаимного сравнения совместных моделей (Coupled Model Intercomparison Project phase 5 and 6 — CMIP5/CMIP6) при воспроизведении РММ и её связи с ЭНЮК. Обнаружено, что в CMIP5/CMIP6 существует большой межмодельный разброс влияния весеннего состояния РММ на фазу ЭНЮК последующей зимой. Также РММ играет важную роль в модулировании развития ЭНЮК [16]. Некоторые модели CMIP6 могут правильно воспроизводить характеристики РММ, но демонстрируют противоречивое взаимодействие РММ с ЭНЮК из-за различий в обратных связях между ветром, испарением и ТПО.

Знание движущих сил ЭНЮК и лежащих в их основе механизмов имеет решающее значение для улучшения прогнозирования ЭНЮК, однако это еще остается предметом для исследований. Существующие дальние связи между тропиками Атлантического и Тихого океанов посредством взаимодействия атмосферы и океана в течение первого и последнего десятилетий XX века указывают на возможность прогнозирования ЭНЮК [17]. Понимание этой междесятилетней модуляции дальних связей Атлантики и Тихого океана может помочь улучшить прогнозы ЭНЮК и связанных с ним воздействий.

Используя совместную модель общей циркуляции океана и атмосферы, в [18] показано, что некоторые произошедшие события ЭНЮК можно ретроспективно предсказать с большой заблаговременностью. Так, состояние Эль-Ниньо зимой 1997/98 г. можно было приближенно предсказать с опережением примерно на 1,5 года, но со слабой интенсивностью и большой фазовой задержкой в прогнозе начала данного исключительно сильного события. Это связано с влиянием активных и интенсивных стохастических порывов западного ветра (westerly wind burst — WWB) [19] в период с конца 1996 г. по середину 1997 г., которые обычно непредсказуемы в сезонных временных масштабах.

С 2002 г. Международный научно-исследовательский институт климата и общества (International Research Institute for Climate and Society — IRI), позже в партнерстве с Центром прогнозирования климата (Climate Prediction Center — CPC), выпускает продукт мультимодельного прогнозирования ЭНЮК, неофициально называемый шлейфом прогнозирования ЭНЮК [20]. В работе [21] исследуются меры по повышению надежности и удобства использования этого продукта, включая поправки смещения и амплитуды, метод мультимодельного ансамбля, формулировку распределения вероятностей и формат выпускаемого продукта. В [22] дается оценка ретроспективным прогнозам ЭНЮК и прогнозам в режиме реального времени из системы Североамериканского мультимодельного ансамбля (North American Multi-Model Ensemble) для 1982—2015 гг. Проверка восьми отдельных моделей из этого ансамбля показывает, что у них несколько различаются навыки прогнозирования ЭНЮК: одни модели постоянно дают более успешные прогнозы, чем другие. В частности, амплитуды некоторых модельных прогнозов ЭНЮК оказываются слишком велики при пересечении весеннего предела предсказуемости (SPB).

В [23] описаны результаты большой выборки совместных ретроспективных прогнозов ЭНЮК за 1982—1998 гг., система прогнозирования которых основана

на модели CCSM3.0 Национального центра атмосферных исследований (National Center for Atmospheric Research — NCAR) и системе усвоения океанических данных, предоставленной Лабораторией геофизической гидродинамики (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory — GFDL) Национального управления океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration — NOAA). Надежность системы прогнозирования ЭНЮК исследована как с детерминированной, так и с вероятностной точки зрения, причем выполнено её сравнение с действующей системой прогнозирования климата (Climate Forecast System — CFS) NOAA. После этого выполнено её объединение с CFS для создания мультимодельной системы прогнозирования. При использовании детерминированных и вероятностных метрик квалификации показано, что мультимодельная комбинация обычно столь же эффективна, как и модель, демонстрирующая лучшую способность прогнозирования ЭНЮК.

В настоящее время ЭНЮК можно достаточно хорошо предсказать с заблаговременностью вплоть до 6 месяцев, но в прогнозах в реальном времени остаются большие погрешности и неопределенности [24]. При этом используются различные подходы для улучшения понимания процессов ЭНЮК и разработаны различные модели для прогнозирования ЭНЮК, в том числе линейные статистические модели, основанные на анализе главных колебательных мод (principal oscillation pattern — POP) и сверточных нейронных сетях (convolutional neural networks — CNN). На основе метода искусственных нейронных сетей в [25] показана возможность прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с учетом их разделения на два типа: центрально- и восточно-тихоокеанский с заблаговременностью от 3 до 9 месяцев.

В [26] разработан метод, основанный на рекуррентной нейронной сети, называемой сетью эхо-состояний (echo state network — ESN), которую можно эффективно обучить для прогнозирования различных индексов ЭНЮК, несмотря на их относительно высокий уровень шума. Для этого модель ESN обучается низкочастотной изменчивости индексов ЭНЮК, затем оценивается потенциальная будущая высокочастотная изменчивость по конкретным образцам её прошлой истории. Этот метод раскрывает важность взаимодействий на различных временных масштабах в механизмах, лежащих в основе ЭНЮК.

В [27] предложена управляемая данными модель для анализа и прогнозирования пространственно распределенных временных рядов. Модель основана на линейной динамической моде (linear dynamical mode) декомпозиции наблюдаемых данных, которая получена из недавно разработанного подхода нелинейного уменьшения размерности. Ключевым моментом этого подхода является его способность учитывать простые динамические свойства наблюдаемой системы посредством выявления доминирующих временных масштабов системы. Этот метод применен к полю аномалий ТПО в тропическом поясе, где основным сигналом изменчивости является ЭНЮК.

Реакция ЭНЮК на глобальное потепление остается неопределенной, что ставит под сомнение прогнозы ЭНЮК в условиях потепления климата. В [28] исследуются изменения характеристик ЭНЮК и предсказуемость в идеализированном

моделировании с четырехкратным увеличением воздействия парниковых газов на основе семи моделей общей циркуляции. Показано, что изменчивость ЭНЮК ослабевает в более теплом климате по сравнению с контрольными экспериментами, при этом нейтральное состояние длится дольше, в то время как активные состояния ЭНЮК длятся короче и смещаются в сторону Ла-Нинья. При этом в условиях потепления шестимесячная предсказуемость ЭНЮК несколько снижается в пяти моделях и увеличивается в двух моделях.

Некоторые климатические модели демонстрируют систематические ошибки в представлении ЭНЮК, которые в значительной степени присутствуют в тропическом сезонном прогнозировании даже для коротких периодов заблаговременности [29]. Связанные с ЭНЮК прогнозируемые аномалии ТПО для зимы/весны значительно расширяются или смещаются к западу, а также слишком устойчивы во время фазы завершения событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

Результаты тестирования связанной с глобальными аномалиями системы прогнозирования ЭНЮК, включающей модель общей циркуляции и систему усвоения океанических данных, демонстрируют, что средние по ансамблю прогнозы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья полезны до заблаговременности 7—9 месяцев [30]. Таким образом, заблаговременное (более года) прогнозирование ЭНЮК до сих пор является важной и сложной научной задачей. Поскольку единая и полная теория ЭНЮК еще не создана, то для прогнозирования ЭНЮК с помощью соответствующих численных моделей используются связанные индикаторы, такие как индекс Niño3.4 и индекс Южного колебания (Southern Oscillation index — SOI). Однако поскольку ЭНЮК представляет собой очень сложное и динамичное явление, а индексы Niño3.4 и SOI смешивают много низкочастотных и высокочастотных компонентов, то точность предсказания современных численных методов прогнозирования ЭНЮК до сих пор остается достаточно невысокой [31].

В начале 2014 г. несколько прогностических систем прогнозировали сильное событие Эль-Ниньо, подобное 1997/1998 гг., для следующей зимы 2014/2015 гг. [32]. Конечным результатом стали небольшие положительные аномалии ТПО в тропиках Тихого океана. Напротив, следующей зимой 2015/2016 гг. произошло одно из самых сильных событий Эль-Ниньо за всю историю наблюдений, которое не было спрогнозировано в начале 2015 г. [20]. Таким образом, несмотря на продемонстрированную ретроспективную предсказуемость ЭНЮК, прогнозы событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья в реальном времени и связанных с ними явлений за пределами тропической части Тихого океана не всегда оправдываются. Существует необходимость более подробно рассмотреть предсказуемость аномальных особенностей вне тропиков Тихого океана, которые, как известно, связаны с ЭНЮК (например, индийские муссоны и осадки в Сахеле, засуха на юге Африки и ТПО вне тропиков) [11]. Кроме того, требуется установить относительную важность для ЭНЮК различных физических механизмов в океане и атмосфере. Сезонная зависимость предсказуемости ЭНЮК прослеживается во многих моделях, но ответственные за нее процессы до конца не изучены, а её значение до сих пор является предметом научных дискуссий. Более того, наблюдаются заметные междесятилетние различия в успешности прогнозов ЭНЮК, и причины этого все еще полностью не ясны.

В работах [33—39], по данным наблюдений, реанализам и моделям CMIP5, показано, что ЭНЮК является элементом планетарного явления, названного Глобальной атмосферной осцилляцией (ГАО). В работах [40, 41], по данным наблюдений и реанализам на основе западно-восточного распространения планетарной пространственной структуры ГАО, предложен механизм прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья с примерно годовой заблаговременностью. В [42] показано, что некоторые из моделей CMIP6 воспроизводят планетарную структуру ГАО и демонстрируют сильные дальние связи ЭНЮК с аномалиями ТПО и ДУМ вне тропиков Тихого океана.

Целью данной работы является оценка возможности прогнозирования ЭНЮК моделями CMIP6 на основе западно-восточного распространения планетарной структуры ГАО с использованием ГАО как главной моды глобальной межгодовой климатической изменчивости.

Методика исследования

Исследованы глобальные среднемесячные значения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) и атмосферного давления на уровне моря (ДУМ), полученные в результате преиндустриального контрольного (preindustrial control — piControl) и исторического (Historical) экспериментов климатических моделей Земной системы, входящих в CMIP6 [43]. Организации-разработчики, названия и основные характеристики анализируемых моделей CMIP6 представлены в табл. 1. Исследуемые модели выбраны, исходя из анализа сравнения внетропических дальних связей ЭНЮК в моделях CMIP6, а также отсутствия в результатах эксперимента piControl так называемого «дрейфа» [42].

В эксперименте piControl воздействие от каких-либо внешних сил является постоянным и находится на уровне преиндустриального периода. Единственной периодической внешней силой, воздействующей на климатическую систему в этом эксперименте, является годовой ход поступления тепла от Солнца. Благодаря этому в результатах эксперимента piControl должны практически отсутствовать длительные тренды изменения климата («дрейф»), и нет необходимости удалять эти тренды. Таким образом, в результатах эксперимента piControl присутствует только внутренняя естественная динамика климата, к которой и относится ЭНЮК.

Продолжительность эксперимента piControl для большинства моделей CMIP6 составляет 500 модельных лет и варьируется от 311 до 1200 лет, поэтому для тех моделей CMIP6, для которых это возможно, все вычисления были дополнительно повторены по сокращенным рядам единой длины (500 лет). Эти результаты оказались близки к результатам, полученным по данным различной продолжительности. Также дополнительно все результаты были рассчитаны отдельно для первых 150 лет и следующих за ними 150 лет эксперимента piControl.

Дополнительно для анализа устойчивости полученных результатов в условиях современного меняющегося климата были исследованы данные эксперимента Historical за 1850—2014 гг., в котором присутствует форсинг от изменения

концентрации парниковых газов в атмосфере, благодаря чему модели CMIP6 воспроизводят потепление климата последних десятилетий. Результаты, полученные по эксперименту Historical, оказались близки к результатам, полученным по эксперименту piControl.

Чтобы идентифицировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья использовался индекс, который называется океанический индекс Ниньо (Oceanic Niño Index — ONI). ONI представляет собой средние значения аномалий ПТВ в центрально-восточной части экваториального региона Тихого океана — регионе Niño3.4 (рис. 1 *a*). В каждом узле пространственной сетки отдельно взятой модели CMIP6 вычислены аномалии ПТВ и ДУМ относительного среднего годового хода за весь исследуемый период (далее — аномалии). Затем аномалии ПТВ усреднялись в регионе Niño3.4 (5° с.ш. — 5° ю.ш., 170° — 120° з.д.), и полученный временной ряд сглаживался трехмесячным скользящим средним для получения своего собственного для каждой модели временного ряда ONI. Затем по полученным временным рядам ONI отдельно для каждой модели определялись события Эль-Ниньо и Ла-Нинья. При Эль-Ниньо (Ла-Нинья) значения ONI должны непрерывно превышать $+0,5^\circ\text{C}$ (быть менее $-0,5^\circ\text{C}$) на протяжении пяти месяцев или более. В случае эксперимента Historical длительные изменения климата дополнительно подавлялись в ряде ONI с помощью тридцатилетнего фильтра Баттерворта высоких частот.

Для того, чтобы идентифицировать текущую фазу ГАО, использован индекс GAO1, который рассчитывается как алгебраическая комбинация нормированных значений аномалий ДУМ в десяти районах, совпадающих с максимумами и минимумами в пространственной структуре аномалий ДУМ поля ГАО, соответствующей по фазе максимуму событий Эль-Ниньо (рис. 2 *a*) [36, 44].

Для прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья используется индекс-предиктор, основанный на западно-восточном распространении пространственной структуры ГАО (Predictor GAO — PGO) [40, 41]. PGO опережает ONI и GAO1 примерно на один год, и рассчитывается как алгебраическая комбинация нормированных значений средних аномалий ПТВ и ДУМ в пятнадцати районах поля ГАО, опережающей по фазе начало событий Эль-Ниньо.

Методам выделения главных мод климатической изменчивости посвящены работы разных авторов, например, анализ главных компонент (Principal Component Analysis — PCA) с использованием идеи нелинейности и теории динамических систем, который применен в [45]. Мы применили географически взвешенный PCA, именуемый методом разложения на эмпирические ортогональные функции (Empirical Orthogonal Function — EOF), для выделения главных глобальных мод изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ на межгодовых периодах колебаний собственных ГАО и ЭНЮК. Для этого была произведена предварительная полосовая фильтрация фильтром Баттерворта от двух до семи лет рядов аномалий ПТВ и ДУМ в каждом узле глобальной сетки данных. Полосовая фильтрация производилась для периодов от двух до семи лет, поскольку в [42] найдено, что именно в этом диапазоне наблюдаются наиболее высокие энергии колебаний индекса ONI моделей CMIP6. Также для подавления сильной изменчивости аномалий ПТВ и

ДУМ в высоких широтах по сравнению с тропиками временные ряды в каждом узле сетки были умножены на корень из косинуса широты этого узла. После этого к полученным фильтрованным и нормированным аномалиям ПТВ и ДУМ применен PCA для получения межгодовых первой и второй главных компонент (EOF1 и EOF2). Их анализ позволяет выбрать те модели CMIP6, у которых глобальные межгодовые EOF1 и EOF2 — это разные фазы одного и того же процесса, т. е. западно-восточного распространения ГАО. Связи между EOF1 и EOF2, а также между ними и ONI, GAO1 и PGO1 затем оценивались с помощью взаимного спектрального и корреляционного анализа.

Результаты исследования

По результатам моделей CMIP6, указанным в табл. 1, построено среднемодельное поле первой главной компоненты (PC1 — пространственная структура EOF1) межгодовой изменчивости аномалий ПТВ (PC1 ПТВ) (рис. 1 а). При её построении для каждой модели в отдельности по нормированным и фильтрованным для периодов колебаний от двух до семи лет в каждом узле модельной сетки аномалиям ПТВ вычислены первые десять главных компонент. Найденные для каждой модели поля первой главной компоненты интерполированы на единую сетку $1^\circ \times 1^\circ$. Затем выполнено усреднение интерполированных полей PC1 ПТВ по выбранным моделям CMIP6.

Таблица 1

Основные характеристики моделей CMIP6 и кросс-корреляции 1-х главных компонент аномалий ПТВ и ДУМ с ONI и GAO1 по эксперименту Historical

Main characteristics of the CMIP6 models and cross-correlation of the 1st PCs of the SAT and SLP anomalies with ONI and GAO1 by Historical experiment

Разработчик модели	Название модели	Среднее разрешение модели ($^\circ\text{ш.} \times ^\circ\text{д.}$)	Вклад EOF1 ПТВ (%)	Вклад EOF2 ПТВ (%)	Вклад EOF1 ДУМ (%)	Вклад EOF2 ДУМ (%)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и GAO1	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ДУМ и GAO1 (месяцы)
AS-RCEC	TaiESM1	0,938 x 1,250	46,5	19,6	44,5	19,1	0,87	2	0,81	1
AWI	AWI-CM-1-1-MR	0,938 x 0,938	40,5	11,2	36,4	16,8	0,79	3	0,88	0
AWI	AWI-ESM-1-1-LR	1,875 x 1,875	36,4	11,6	29,4	16,8	0,75	3	0,77	0
BCC	BCC-CSM2-MR	1,125 x 1,125	30,2	10,2	31,8	19,2	0,80	2	0,83	0
BCC	BCC-ESM1	2,812 x 2,812	26,4	13,6	31,0	18,1	0,83	1	0,75	0
CAMS	CAMS-CSM1-0	1,125 x 1,125	43,0	12,1	34,8	21,3	0,78	2	0,75	0
CAS	CAS-ESM2-0	1,406 x 1,406	45,4	14,8	37,6	20,4	0,87	2	0,70	0
CAS	FGOALS-f3-L	1,000 x 1,250	50,6	14,2	47,1	15,1	0,89	3	0,79	0

Продолжение табл. 1

Разработчик модели	Название модели	Среднее разрешение модели (°ш. × °д.)	Вклад EOF1 ПТВ (%)	Вклад EOF2 ПТВ (%)	Вклад EOF1 ДУМ (%)	Вклад EOF2 ДУМ (%)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI (месяцы)
CAS	FGOALS-g3	2,250 x 2,000	44,6	10,8	41,3	17,1	0,82	2	0,84	0
CCCma	CanESM5	2,812 x 2,812	40,1	12,4	40,4	16,7	0,80	3	0,80	0
CCCma	CanESM5-CanOE	2,812 x 2,812	36,8	12,0	36,1	16,4	0,77	3	0,84	0
CCCR-IITM	IITM-ESM	1,915 x 1,875	39,1	15,6	33,9	21,4	0,78	2	0,78	0
CMCC	CMCC-CM2-SR5	0,938 x 1,250	42,2	12,2	42,3	13,6	0,85	3	0,86	0
CMCC	CMCC-ESM2	0,938 x 1,250	47,7	13,1	44,9	13,0	0,88	3	0,86	0
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1	1,406 x 1,406	39,7	11,7	35,6	20,3	0,84	3	0,85	0
CNRM-CERFACS	CNRM-CM6-1-HR	0,500 x 0,500	33,0	13,7	27,2	22,6	0,70	2	0,42	0
CNRM-CERFACS	CNRM-ESM2-1	1,406 x 1,406	37,5	13,8	34,4	16,4	0,81	3	0,86	0
CSIRO-ARCCSS	ACCESS-CM2	1,250 x 1,875	33,4	14,3	32,6	16,6	0,79	2	0,72	0
CSIRO	ACCESS-ESM1-5	1,241 x 1,875	33,2	10,7	34,5	16,5	0,75	3	0,85	0
E3SM-Project	E3SM-1-0	1,000 x 1,000	37,0	12,1	36,5	14,8	0,86	2	0,86	0
E3SM-Project	E3SM-1-1	1,000 x 1,000	36,0	11,5	35,9	17,8	0,82	2	0,86	0
E3SM-Project	E3SM-1-1-ECA	1,000 x 1,000	38,5	12,1	36,6	19,1	0,79	3	0,81	0
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3	0,703 x 0,703	36,9	10,8	33,9	17,9	0,78	2	0,80	0
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3-AerChem	0,703 x 0,703	38,7	13,8	35,1	18,7	0,76	2	0,71	0
EC-Earth-Consortium	EC-Earth3-Veg	0,703 x 0,703	41,0	11,7	36,0	19,1	0,82	2	0,82	0
FIO-QLNM	FIO-ESM-2-0	0,938 x 1,250	42,0	15,5	42,2	15,4	0,81	2	0,82	0
HAMMOZ-Consortium	MPI-ESM-1-2-HAM	1,875 x 1,875	38,8	11,9	33,6	16,6	0,83	2	0,79	0
INM	INM-CM4-8	1,500 x 2,000	30,9	12,4	23,6	20,1	0,55	1	0,09	-
INM	INM-CM5-0	1,500 x 2,000	30,2	11,6	25,0	21,4	0,67	1	0,70	0
IPSL	IPSL-CM6A-LR	1,259 x 2,500	45,1	10,0	38,9	20,0	0,81	2	0,83	0
KIOST	KIOST-ESM	1,875 x 1,875	42,3	12,5	39,5	22,9	0,82	3	0,70	0
MIROC	MIROC-ES2L	2,812 x 2,812	56,1	12,8	48,3	17,5	0,92	3	0,85	1
MIROC	MIROC6	1,406 x 1,406	49,0	12,6	45,0	15,3	0,90	3	0,89	0
MOHC	HadGEM3-GC31-LL	1,250 x 1,875	36,8	12,3	37,1	15,2	0,80	2	0,87	0

Окончание табл. 1

Разработчик модели	Название модели	Среднее разрешение модели (°ш. × °д.)	Вклад EOF1 ПТВ (%)	Вклад EOF2 ПТВ (%)	Вклад EOF1 ДУМ (%)	Вклад EOF2 ДУМ (%)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ПТВ и ONI (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI	Сдвиг при макс. корр. EOF1 ДУМ и GAOI (месяцы)
МОHC	HadGEM3-GC31-MM	0,556 x 0,833	37,0	15,1	36,3	16,8	0,84	3	0,74	0
МОHC	UKESM1-0-LL	1,250 x 1,875	40,9	13,9	40,7	14,0	0,83	3	0,89	0
МОHC	UKESM1-1-LL	1,250 x 1,875	40,3	12,2	40,7	14,1	0,86	3	0,88	0
MPI-M	MPI-ESM1-2-HR	0,938 x 0,938	36,0	10,7	34,3	16,6	0,83	2	0,76	0
MPI-M	MPI-ESM1-2-LR	1,875 x 1,875	44,2	9,2	35,8	19,3	0,87	2	0,90	0
MRI	MRI-ESM2-0	1,125 x 1,125	39,7	14,2	41,0	17,0	0,87	2	0,78	0
NASA-GISS	GISS-E2-1-G	2,000 x 2,500	52,6	16,9	51,2	16,6	0,88	4	0,76	1
NASA-GISS	GISS-E2-1-G-CC	2,000 x 2,500	52,2	16,0	51,3	14,3	0,87	3	0,74	1
NASA-GISS	GISS-E2-1-H	2,000 x 2,500	46,5	15,8	45,8	14,1	0,87	3	0,82	0
NASA-GISS	GISS-E2-2-H	2,000 x 2,500	35,7	11,9	32,2	21,4	0,79	1	0,57	0
NCAR	CESM2	0,938 x 1,250	44,8	14,6	42,5	17,3	0,86	3	0,86	0
NCAR	CESM2-FV2	1,875 x 2,500	49,6	17,7	47,6	16,5	0,89	3	0,88	0
NCAR	CESM2-WACCM	0,938 x 1,250	43,1	13,6	42,6	14,5	0,88	3	0,87	0
NCAR	CESM2-WACCM-FV2	1,875 x 2,500	47,7	17,3	45,5	17,0	0,89	2	0,85	0
NCC	NorCPM1	1,875 x 2,500	41,5	15,3	43,4	15,8	0,82	3	0,78	0
NCC	NorESM2-LM	1,875 x 2,500	42,4	15,5	42,6	14,9	0,82	3	0,85	0
NCC	NorESM2-MM	0,938 x 1,250	44,1	11,1	42,1	13,6	0,83	3	0,86	0
NIMS-KMA	KACE-1-0-G	1,250 x 1,875	31,8	16,6	32,7	16,7	0,81	2	0,76	0
NOAA-GFDL	GFDL-CM4	1,000 x 1,250	38,3	12,8	38,8	14,0	0,83	2	0,88	0
NOAA-GFDL	GFDL-ESM4	1,000 x 1,250	44,6	9,8	44,4	14,8	0,85	2	0,89	0
NUIST	NESM3	1,875 x 1,875	38,3	12,4	34,7	18,1	0,80	1	0,80	0
SNU	SAM0-UNICON	0,938 x 1,250	39,7	15,8	40,4	13,4	0,87	2	0,86	0
THU	CIESM	0,938 x 1,250	45,0	13,4	41,4	14,3	0,84	3	0,87	0
UA	MCM-UA-1-0	2,250 x 3,750	30,7	12,9	29,3	18,1	0,81	1	0,78	0

Структура среднемодельной PC1 ПТВ (рис. 1 а) по своей форме во многих деталях повторяет глобальную структуру среднего поля разности аномалий ПТВ между противоположными фазами ЭНЮК по индексу ONI для исследуемых моделей CMIP6 [42] — планетарную структуру ГАО ПТВ. Исходя из этого, можно предположить, что ГАО и ее элемент ЭНЮК соответствуют главной моде глобальной климатической изменчивости аномалий ПТВ на межгодовых временных масштабах для большинства исследуемых моделей CMIP6. Вклад EOF1 в дисперсию находится в диапазоне 26—56 % (табл. 1, столбцы 4 и 6). Относительную степень

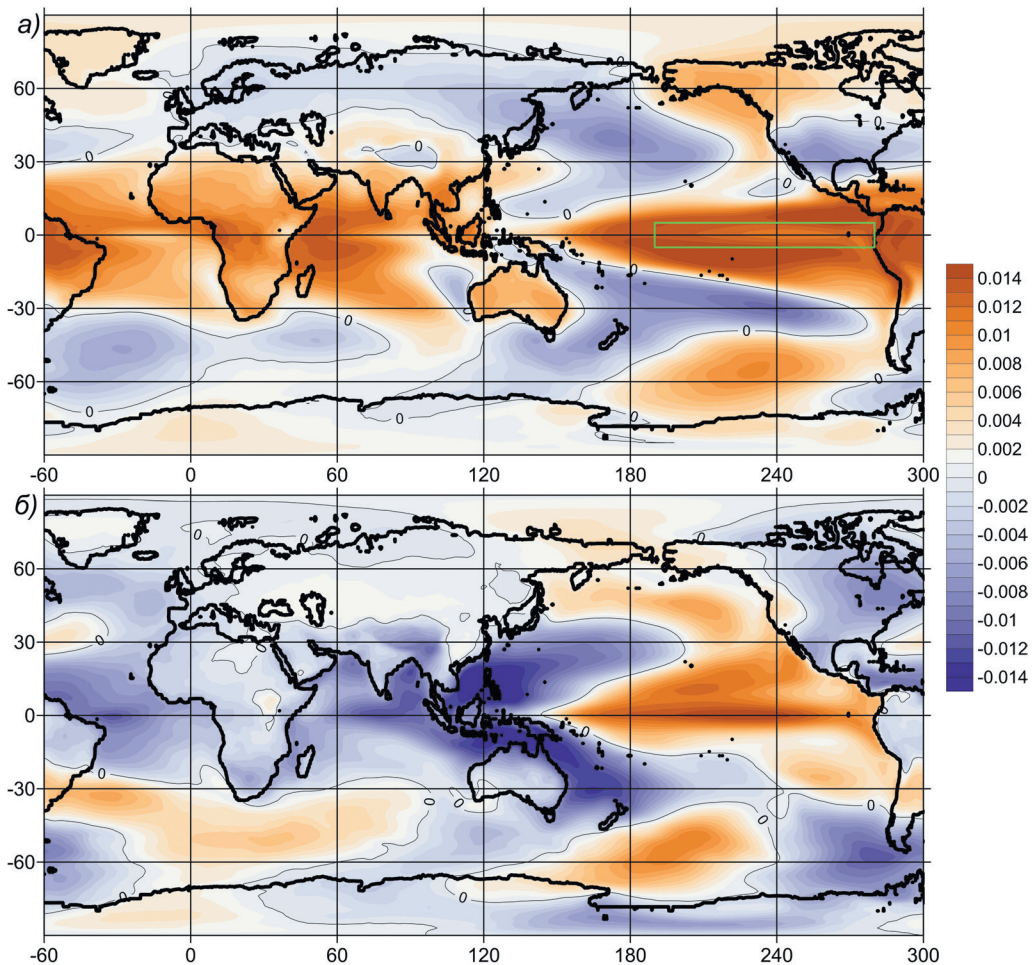


Рис. 1. Средние первая (а) и вторая (б) главные компоненты межгодовой изменчивости аномалий приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) по 58 (а) и 23 (б) моделям CMIP6 (эксперимент Historical). Зеленым прямоугольником выделен регион, по которому вычисляется ONI.

Fig. 1. Average 1st (a) and 2nd (b) principal components of interannual variability of surface air temperature (SAT) anomalies for 58 (a) and 23 (b) CMIP6 models (Historical experiment). The green rectangle marks the region for which ONI is calculated.

этого соответствия для каждой модели в отдельности можно оценить по максимальным величинам взаимных корреляций между EOF1 ПТВ и ONI, и сдвигам при которых эти максимальные кросс-корреляции достигаются (табл. 1, столбцы 8—11).

Предположение о том, что ГАО есть главная мода глобальной климатической изменчивости исследуемых моделей CMIP6 на межгодовых временных

масштабах, подтверждает и среднемодельное поле первой главной компоненты межгодовой изменчивости аномалий ДУМ (PC1 ДУМ), вычисленное аналогичным PC1 ПТВ способом по результатам исследуемых моделей CMIP6 (рис. 2 *a*). Структура PC1 ДУМ также практически полностью соответствует планетарной структуре среднего поля разности аномалий ДУМ между противоположными фазами ЭНЮК по индексу ONI для исследуемых моделей CMIP6 [42], т. е.

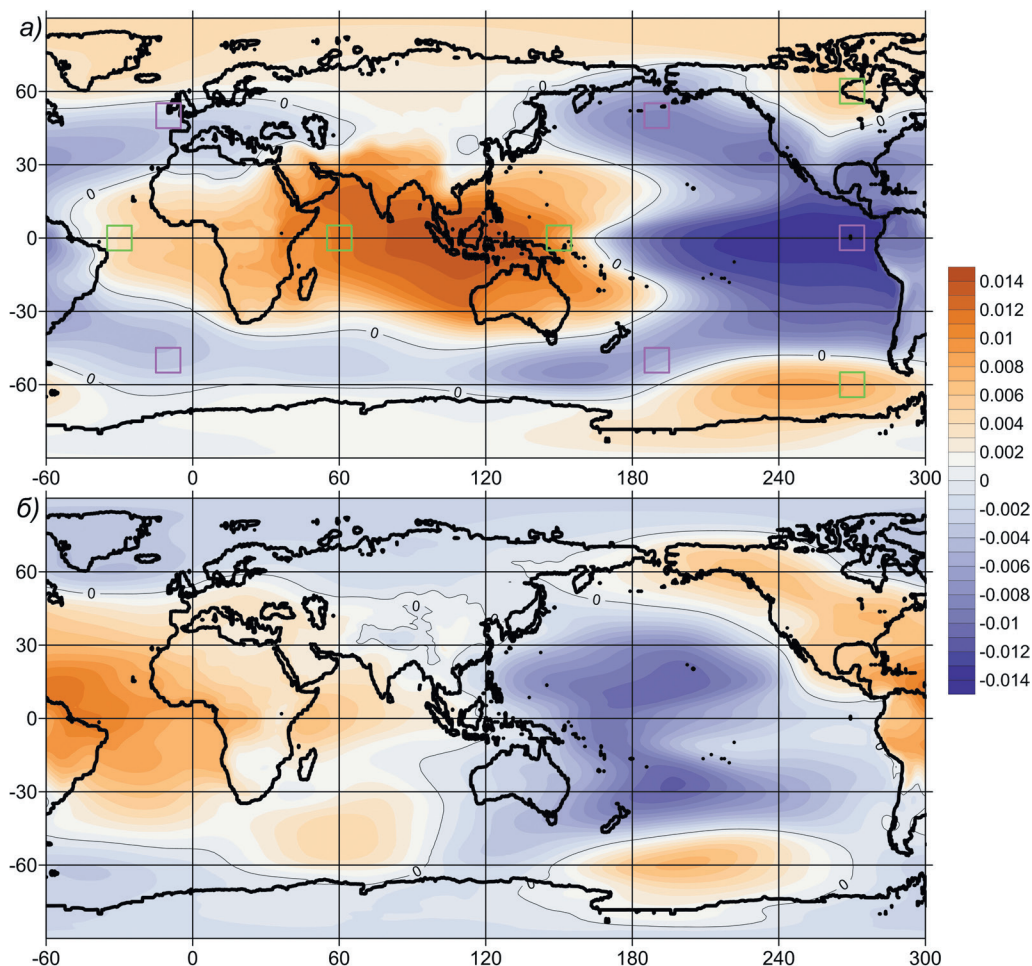


Рис. 2. Средние первая (*a*) и вторая (*б*) главные компоненты межгодовой изменчивости аномалий давления на уровне моря (ДУМ) по 58 (*a*) и 23 (*б*) моделям CMIP6 (эксперимент Historical). Зелеными и фиолетовыми квадратами выделены регионы, по которым вычисляется GAO1.

Fig. 2. Average 1st (*a*) and 2nd (*b*) principal components of interannual variability of sea level pressure (SLP) anomalies for 58 (*a*) and 23 (*b*) CMIP6 models (Historical experiment). Green and purple squares highlight the regions for which GAO1 is calculated.

планетарной структуре ГАО ДУМ. Относительную степень этого соответствия для каждой из исследуемых моделей в отдельности можно оценить по максимальным величинам кросс-корреляций между EOF1 ДУМ и GAO1, и сдвигам, при которых эти максимальные кросс-корреляции достигаются (табл. 1).

Следует учесть, что перед нахождением главных компонент к временным рядам аномалий ПТВ и ДУМ для каждого узла сетки в отдельности применялась полосовая фильтрация от двух до семи лет. Благодаря этой предварительной полосовой фильтрации оказались подавлены практически все флуктуации, не относящиеся к межгодовой изменчивости. Однако использование полосовой фильтрации существенно исказило исходные аномалии ПТВ и ДУМ, а также, соответственно, и результаты РСА. Полученные главные компоненты относятся только к межгодовой изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ, а не к данным ПТВ и ДУМ в целом. Тем не менее, без применения указанной полосовой фильтрации не удалось бы добиться того, чтобы для каждой из исследуемых моделей первая главная компонента аномалий ПТВ и ДУМ соответствовала именно самому сильному сигналу межгодовой климатической изменчивости, которым является ЭНЮК, поэтому частично именно благодаря примененной фильтрации первые главные компоненты аномалий ПТВ и ДУМ исследуемых моделей СМIP6 соответствуют ЭНЮК и ГАО. И при их усреднении получаются среднемодельные поля PC1 ПТВ и PC1 ДУМ (рис. 1 *a* и 2 *a*), повторяющие во многих деталях планетарные структуры ГАО, полученные в [42] с помощью композиционного метода. Из-за особенностей алгоритма разложения на главные компоненты они в случае необходимости брались с противоположным знаком.

Табл. 1 содержит максимальные для сдвигов от -60 до $+60$ мес. значения взаимных корреляций EOF1 глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ (EOF1 ПТВ) и индекса ONI, а также сдвиги, которым эти значения соответствуют. Высокие значения кросс-корреляций EOF1 ПТВ и ONI (около 0,8) подтверждают то, что первые главные компоненты глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ исследуемых моделей СМIP6 относятся именно к ЭНЮК. При этом наблюдаются небольшие запаздывания (1—3 месяца) EOF1 ПТВ по отношению к ONI, что свидетельствует о том, что планетарная пространственная структура PC1 ПТВ (рис. 1 *a*) связана с откликом на события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, вызванные глобальными дальними связями ЭНЮК, объединенными в ГАО. При этом следует учесть, что при нулевом сдвиге корреляция EOF1 ПТВ и индекса ONI несущественно отличается от приведенной в табл. 1 максимальной корреляции. При анализе значений кросс-корреляций табл. 1 следует принять во внимание полосовую фильтрацию от двух до семи лет, предварительно примененную к аномалиям ПТВ, по которым затем вычислялись EOF1. Из-за применения данной фильтрации значения корреляций оказались завышены, а корреляционные функции — сглажены, и скорее позволяют относительно оценить для каждой модели степень связи между EOF1 ПТВ и ONI в сравнении с другими исследуемыми моделями СМIP6, чем определить вклад ЭНЮК в EOF1 ПТВ.

В табл. 1 приведены максимальные для сдвигов от -60 до $+60$ месяцев значения взаимных корреляций EOF1 глобальной межгодовой изменчивости аномалий

ДУМ (EOF1 ДУМ) и индекса GAO1, а также сдвиги, которым эти значения соответствуют. Межмодельный разброс значений кросс-корреляций EOF1 ДУМ и GAO1 выше, чем для EOF1 ПТВ и ONI, что свидетельствует о том, что модели CMIP6 воспроизводят планетарную пространственную структуру ГАО, по которой вычисляется индекс GAO1, хуже, чем аномалии ПТВ в характерном для ЭНЮК экваториальном районе центрально-восточной части Тихого океана. При этом следует учесть более высокую зашумленность GAO1 по сравнению с ONI. Последний вычисляется как аномалии ПТВ над экватором Тихого океана. Из-за этого ONI во многом определяет ТПО в данном районе, которая обладает существенно более высокой инерцией по сравнению с такой атмосферной характеристикой как ДУМ. Однако сдвиги, при которых наблюдаются максимальные корреляции между EOF1 ДУМ и GAO1, равняются 0 для большинства исследуемых моделей CMIP6, что говорит о квазисинхронности EOF1 ДУМ и GAO1.

Таким образом, полученные среднемодельные планетарные пространственные структуры первых главных компонент глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ соответствуют с небольшим запаздыванием (1—3 месяца) максимальной фазе развития событий Эль-Ниньо и квазисинхронны с положительной фазой ГАО. Соответствие среднемодельных PC1 ПТВ и PC1 ДУМ именно положительным фазам ЭНЮК и ГАО объясняется тем, что в случае необходимости для некоторых моделей главные компоненты брались с противоположным знаком. Полосовая фильтрация применялась только к аномалиям ПТВ и ДУМ перед вычислением главных компонент, а не к индексам ONI и GAO1. Благодаря этому высокие значения максимальных кросс-корреляций при небольших сдвигах (табл. 1) подтверждают, что ЭНЮК и ГАО являются первыми главными компонентами глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ.

Для оценки возможности прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья исследуемыми моделями CMIP6 важное значение имеют средне-модельные вторые главные компоненты (PC2 — пространственные структуры EOF2) глобальной межгодовой изменчивости аномалий ПТВ (PC2 ПТВ) (рис. 1 б) и ДУМ (PC2 ДУМ) (рис. 2 б). Они важны, поскольку те модели, в которых PC2 ПТВ и PC2 ДУМ являются фазами ГАО, опережающими события Эль-Ниньо и Ла-Нинья, потенциально могут иметь более высокую способность прогнозировать эти события на основе западно-восточного распространения планетарной структуры ГАО. Вклад EOF2 в дисперсию находится в диапазоне 9—23% (табл. 1, столбцы 5 и 7). PC2 ПТВ и PC2 ДУМ строились аналогично первым компонентам, но при этом усреднялись вторые главные компоненты части исследуемых моделей CMIP6. Модели для этого подмножества выбирались следующим образом. Вычислялись значения кросс-корреляций между PGAO (индексом-предиктором ЭНЮК) и EOF2 по аномалиям ПТВ и ДУМ (табл. 2, столбцы 10 и 11). Если величины этих корреляций анализируемой модели имеют статистическую значимость менее $\alpha = 0,05$, то эта модель включалась в ансамбль для усреднения двух главных компонент (табл. 2, столбец 12). Причина выбора такого критерия заключается в том, что далеко не все из исследуемых моделей CMIP6 имеют вторую главную компоненту глобальных межгодовых колебаний аномалий ПТВ и ДУМ, связанную с ГАО и опережающую

по фазе события Эль-Ниньо. Благодаря критерию наличия значимой связи EOF2 с P_{GAO} и опережению P_{GAO} индексов ONI и GAO1 были выбраны те модели CMIP6, вторая главная компонента которых соответствует фазе ГАО, предшествующей событиям Эль-Ниньо. При этом для опережения индексом P_{GAO} именно положительной фазы ЭНЮК в случае необходимости главные компоненты у некоторых моделей брались с противоположным знаком.

Таблица 2

Кросс-корреляции первой и второй эмпирических ортогональных функций аномалий ПТВ и ДУМ между собой, а также с P_{GAO} (CMIP6 Historical)

Cross-correlations of the 1st and 2nd empirical orthogonal functions of the SAT and SLP anomalies with each other, as well as with P_{GAO} (CMIP6 Historical)

Название модели	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Корр. EOF2 ПТВ и P _{GAO}	Корр. EOF2 ДУМ и P _{GAO}	Включена ли модель в подсчет PC2
TaiESM1	0,91	1	0,78	1	0,67	8	0,54	7	0,65	0,85	да
AWI-CM-1-1-MR	0,74	1	0,12	15	0,50	5	0,45	0	0,51	0,02	нет
AWI-ESM-1-1-LR	0,57	1	0,25	0	0,45	5	0,59	0	0,36	0,07	нет
BCC-CSM2-MR	0,74	1	0,54	0	0,14	-38	0,47	0	0,04	0,05	нет
BCC-ESM1	0,71	1	0,49	1	0,20	-8	0,58	0	0,35	0,06	нет
CAMS-CSM1-0	0,71	1	0,08	9	0,46	-10	0,37	0	0,14	0,05	нет
CAS-ESM2-0	0,72	1	0,21	-1	0,49	6	0,67	0	0,64	0,15	нет
FGOALS-f3-L	0,79	1	0,35	0	0,70	7	0,32	0	0,36	0,18	да
FGOALS-g3	0,81	1	0,12	29	0,59	-11	0,36	0	0,31	0,21	да
CanESM5	0,62	1	0,42	0	0,38	-15	0,63	0	0,24	0,06	нет
CanESM5-CanOE	0,64	3	0,14	2	0,48	-15	0,20	0	0,58	0,10	нет
IITM-ESM	0,66	2	0,55	1	0,42	7	0,38	-5	0,49	0,67	да
CMCC-CM2-SR5	0,84	1	0,17	-10	0,54	11	0,33	0	0,63	0,09	нет
CMCC-ESM2	0,85	1	0,53	2	0,56	10	0,36	14	0,43	0,79	да
CNRM-CM6-1	0,79	2	0,42	0	0,49	-10	0,16	5	0,20	0,06	нет
CNRM-CM6-1-HR	0,33	0	0,45	0	0,42	-10	0,74	0	0,30	0,09	нет
CNRM-ESM2-1	0,77	1	0,08	-20	0,47	-10	0,35	0	0,37	0,03	нет
ACCESS-CM2	0,74	1	0,58	1	0,47	-8	0,47	0	0,42	0,49	да
ACCESS-ESM1-5	0,76	1	0,37	0	0,57	-12	0,27	0	0,26	0,13	нет
E3SM-1-0	0,82	1	0,32	0	0,40	7	0,16	4	0,58	0,34	да
E3SM-1-1	0,80	1	0,12	-3	0,51	6	0,33	0	0,61	0,19	да
E3SM-1-1-ECA	0,82	1	0,16	1	0,50	6	0,21	0	0,59	0,04	нет
EC-Earth3	0,74	1	0,16	1	0,32	-11	0,26	0	0,47	0,12	нет
EC-Earth3-AerChem	0,66	1	0,31	0	0,44	-8	0,13	35	0,44	0,08	нет

Название модели	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ	Сдвиг EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ (месяцы)	Макс. корр. EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ	Сдвиг EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ (месяцы)	Корр. EOF2 ПТВ и PGAO	Корр. EOF2 ДУМ и PGAO	Включена ли модель в подсчет PC2
EC-Earth3-Veg	0,76	1	0,18	1	0,43	-10	0,15	33	0,42	0,13	нет
FIO-ESM-2-0	0,80	1	0,60	1	0,52	9	0,35	-1	0,63	0,73	да
MPI-ESM-1-2-HAM	0,70	1	0,18	0	0,48	9	0,64	0	0,34	0,15	нет
INM-CM4-8	0,15	17	0,47	1	0,31	-17	0,47	0	0,56	0,40	да
INM-CM5-0	0,45	1	0,19	0	0,27	-12	0,25	0	0,47	0,10	нет
IPSL-CM6A-LR	0,68	2	0,33	0	0,47	-14	0,20	0	0,21	0,08	нет
KIOST-ESM	0,74	2	0,34	0	0,52	-11	0,30	0	0,13	0,02	нет
MIROC-ES2L	0,88	3	0,41	3	0,73	11	0,28	16	0,41	0,34	да
MIROC6	0,85	4	0,19	10	0,64	10	0,15	-13	0,41	0,21	да
HadGEM3-GC31-LL	0,74	1	0,10	-46	0,37	-12	0,34	0	0,47	0,07	нет
HadGEM3-GC31-MM	0,76	1	0,54	1	0,45	7	0,28	7	0,55	0,60	да
UKESM1-0-LL	0,81	1	0,14	-2	0,50	-11	0,40	0	0,70	0,06	нет
UKESM1-1-LL	0,81	1	0,17	-13	0,49	7	0,40	0	0,60	0,02	нет
MPI-ESM1-2-HR	0,71	1	0,27	0	0,40	10	0,65	0	0,41	0,12	нет
MPI-ESM1-2-LR	0,78	1	0,15	2	0,48	-15	0,11	0	0,25	0,20	да
MRI-ESM2-0	0,85	1	0,09	10	0,49	7	0,38	0	0,56	0,05	нет
GISS-E2-1-G	0,85	2	0,67	1	0,69	9	0,46	8	0,08	0,59	нет
GISS-E2-1-G-CC	0,82	2	0,65	1	0,65	-15	0,39	6	0,03	0,51	нет
GISS-E2-1-H	0,79	1	0,56	1	0,62	8	0,34	0	0,27	0,41	да
GISS-E2-2-H	0,56	2	0,15	1	0,48	-11	0,65	0	0,49	0,04	нет
CESM2	0,88	1	0,56	1	0,62	7	0,37	10	0,59	0,76	да
CESM2-FV2	0,90	1	0,77	1	0,72	7	0,55	8	0,56	0,80	да
CESM2-WACCM	0,88	1	0,22	3	0,46	7	0,22	0	0,47	0,34	да
CESM2-WACCM-FV2	0,92	1	0,69	1	0,69	7	0,49	8	0,48	0,76	да
NorCPM1	0,85	1	0,10	1	0,59	8	0,41	0	0,52	0,10	нет
NorESM2-LM	0,86	1	0,30	1	0,65	7	0,23	0	0,35	0,42	да
NorESM2-MM	0,86	1	0,26	14	0,68	6	0,28	17	0,26	0,49	да
KACE-1-0-G	0,78	1	0,12	4	0,53	6	0,57	0	0,68	0,14	нет
GFDL-CM4	0,77	1	0,18	0	0,40	-9	0,17	1	0,64	0,22	да
GFDL-ESM4	0,82	1	0,29	0	0,40	-15	0,16	1	0,30	0,11	нет
NESM3	0,79	1	0,30	1	0,30	-11	0,18	0	0,31	0,14	нет
SAM0-UNICON	0,87	1	0,40	1	0,52	8	0,29	12	0,68	0,56	да
CIESM	0,85	1	0,13	1	0,56	-11	0,21	0	0,54	0,07	нет
MCM-UA-1-0	0,77	1	0,07	-53	0,38	-21	0,06	25	0,48	0,11	нет

Среднемоделные PC2 ПТВ (рис. 1 б) и PC2 ДУМ (рис. 2 б) демонстрируют пространственные структуры, которые соответствуют начальной фазе формирования событий Эль-Ниньо. Основным отличием PC2 ПТВ от PC1 ПТВ является наличие отрицательных значений в тропиках Атлантического и Индийского океанов. Именно над этими отрицательными аномалиями ТПО, согласно [33], в начале событий Эль-Ниньо формируется обширная область положительных аномалий ДУМ, являющаяся частью ГАО. При этом в центральной и восточной частях экваториальной области Тихого океана уже начинает формироваться свойственная для Эль-Ниньо структура («язык») положительных аномалий ПТВ. На поле PC2 ПТВ в высоких широтах Тихого океана, так же как на поле PC1 ПТВ, наблюдаются положительные аномалии ПТВ, но на поле PC2 ПТВ они расположены западнее, чем на поле PC1 ПТВ. Это свидетельствует о западно-восточном распространении пространственной структуры ГАО. Структура PC2 ДУМ также расположена западнее структуры PC1 ДУМ, что подтверждает западно-восточную динамику ГАО. Таким образом, ГАО выступает на межгодовых масштабах в качестве своего рода планетарной атмосферной волны, распространяющейся с запада на восток и включающей ЭНЮК в качестве одного из своих элементов. Благодаря этому западно-восточному распространению ГАО и существует возможность заблаговременного прогнозирования событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья.

В табл. 2 представлены абсолютные значения максимальных по модулю взаимных корреляций первой и второй эмпирических ортогональных функций (EOF1 и EOF2) межгодовых колебаний глобальных аномалий ПТВ и ДУМ. Дополнительно приведены сдвиги, соответствующие этим максимальным значениям. Корреляции между EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ за некоторым исключением оказались достаточно высокими (около 0,7—0,9) с небольшими сдвигами по фазе (1—2 месяца) (табл. 2, столбцы 2 и 3). Это свидетельствует о сильных связях между первыми главными компонентами аномалий ПТВ и ДУМ, и небольшим опережении EOF1 ДУМ по отношению к EOF1 ПТВ. Поскольку ПТВ над водной поверхностью сильно зависит от ТПО, обладающей достаточно высокой инерционностью, а ДУМ — это атмосферная характеристика, то опережение EOF1 ДУМ по отношению к EOF1 ПТВ свидетельствует о ведущей роли атмосферы по отношению к океану на межгодовых временных масштабах. При этом есть основания полагать, что чем выше корреляции между EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ, тем сильнее и устойчивее у рассматриваемой модели СМIP6 глобальные дальние связи между атмосферой и океаном на межгодовых периодах, свойственных для ЭНЮК и ГАО.

Значения кросс-корреляций между EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (табл. 2, столбцы 4 и 5) демонстрируют гораздо больший межмодельный разброс, чем между EOF1. Существуют модели, у которых корреляции между EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ выше 0,5, что говорит о наличии достаточно сильной связи. Но при этом также есть модели, у которых корреляции между EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ близки к 0, что свидетельствует об отсутствии существенных связей между ними в этих моделях. Таким образом, первые главные компоненты межгодовых колебаний глобальных аномалий ПТВ и ДУМ оказались достаточно сильно связаны между

собой практически у всех исследуемых моделей СМIP6, а вторые — у существенно меньшего числа моделей СМIP6.

Поскольку ЭНЮК — это процесс взаимодействия атмосферы и океана, а индекс-предиктор PGAO зависит и от аномалий ПТВ и от аномалий ДУМ, то для прогноза событий Эль-Ниньо и Ла-Нинья на основе ГАО лучше подходят те модели СМIP6, которые имеют сильные глобальные дальние связи EOF1 ПТВ и EOF1 ДУМ (табл. 2, столбец 2), а также и EOF2 ПТВ с EOF2 ДУМ (таблица 2, столбец 4). Более того, у таких моделей первые главные компоненты глобальных межгодовых колебаний аномалий ПТВ и ДУМ должны иметь сильные связи с ONI и GAO1 (табл. 1), а вторые главные компоненты этих колебаний должны иметь сильные связи с PGAO (табл. 2, столбцы 10 и 11).

Более того, для долгосрочного прогноза ЭНЮК модели должны иметь такие надежные предикторы, с помощью которых возможно прогнозировать сильные события Эль-Ниньо и Ла-Нинья с заблаговременностью примерно равной одному году, то есть позволяющей преодолеть весенний предел предсказуемости. Рассмотрение максимальных кросс-корреляций между EOF1 ПТВ и EOF2 ПТВ (табл. 2, столбец 6), а также сдвигов, при которых эти корреляции наблюдаются (табл. 2, столбец 7), позволяет заключить, что EOF2 ПТВ некоторых моделей СМIP6 опережает EOF1 ПТВ приблизительно на двенадцать месяцев с величинами корреляций более 0,4. Для этих моделей можно использовать вторую главную компоненту межгодовой изменчивости аномалий ПТВ для прогноза первой главной компоненты, то есть для прогноза ЭНЮК. К EOF1 ДУМ и EOF2 ДУМ это относится в меньшей степени (табл. 2, столбцы 8 и 9). Таким образом, на основе анализа указанных в табл. 1 и табл. 2 кросс-корреляций из исследуемых моделей СМIP6, можно выделить те, которые способны прогнозировать ЭНЮК на основе ГАО.

Чтобы определить пространственные структуры аномалий ПТВ и ДУМ, возникающие до событий Эль-Ниньо, которые можно использовать для прогноза ЭНЮК с разной заблаговременностью, для исследуемых моделей СМIP6 вычислены средние композиционные поля аномалий ПТВ (рис. 3) и ДУМ (рис. 4) со сдвигами -14, -12, -10, -8, -6, -4, -2 и 0 месяцев от момента максимального развития событий Эль-Ниньо. Эти поля демонстрируют свойственное для ГАО западно-восточное распространение планетарных структур аномалий ПТВ и ДУМ [42]. Благодаря западно-восточному распространению с помощью индекса-предиктора PGAO, который описывает структуры аномалий ПТВ и ДУМ, возникающие приблизительно за двенадцать месяцев до кульминации Эль-Ниньо (рис. 3 б и рис. 4 б), можно прогнозировать ЭНЮК примерно с годовой заблаговременностью [41]. Приблизительно за год до этого в умеренных и высоких широтах уже формируются соответствующие аномалии ПТВ и ДУМ (рис. 3 а—в и рис. 4 а—в), но расположены они западнее, чем при Эль-Ниньо. Затем эти аномалии смещаются на восток, что совпадает с началом и развитием самого события. Также важную роль играют аномалии ПТВ и ДУМ в тропиках Атлантического и Индийского океанов — в них аномалии ПТВ и ДУМ, характерные для начала Эль-Ниньо, формируются примерно за год до этих событий.

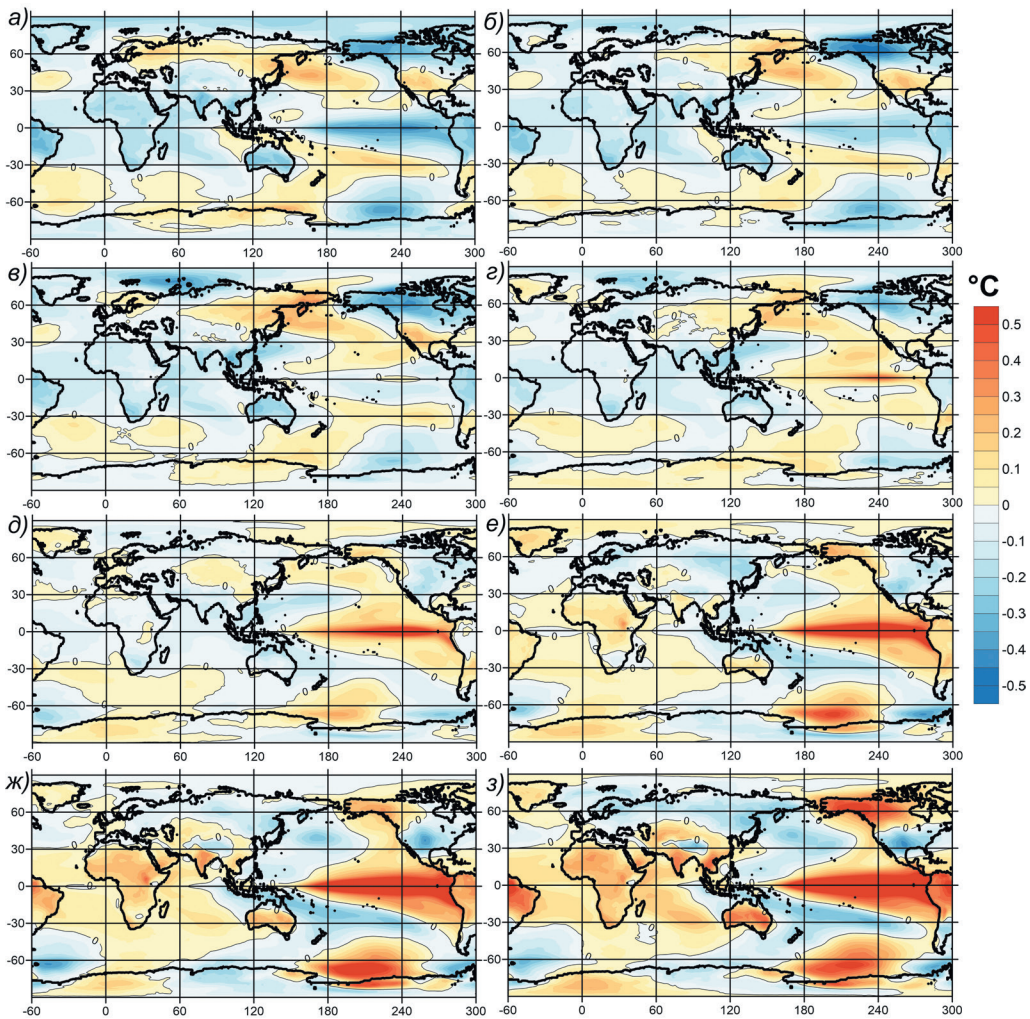


Рис. 3. Средние композиционные поля аномалий ПТВ со сдвигами -14 (а), -12 (б), -10 (в), -8 (г), -6 (д), -4 (е), -2 (ж) и 0 (з) месяцев от максимального развития событий Эль-Ниньо по 58 моделям CMIP6 (эксперимент Historical).

Fig. 3. Average compositional fields of SAT anomalies with shifts -14 (a), -12 (b), -10 (c), -8 (d), -6 (e), -4 (f), -2 (g) and 0 (h) months from maximum of El Niño events for 58 CMIP6 models (Historical experiment).

На рис. 5 представлены средние композиционные поля аномалий ПТВ и ДУМ по индексу PGAO для исследуемых моделей CMIP6. Эти пространственные структуры характерны для фазы ГАО, опережающей приблизительно на двенадцать месяцев максимум событий Эль-Ниньо. Зеленым и фиолетовым цветом на рис. 5 выделены районы, в которых средние аномалии в ПТВ и ДУМ участвуют

в вычислении PGAO с положительным и отрицательным знаком соответственно. Видно, что отмеченные на рис. 5 районы покрывают существенную часть поверхности Земли. Также можно отметить высокую идентичность поля PC2 ПТВ (рис. 1 б) с композиционным полем аномалий ПТВ опережающих максимум

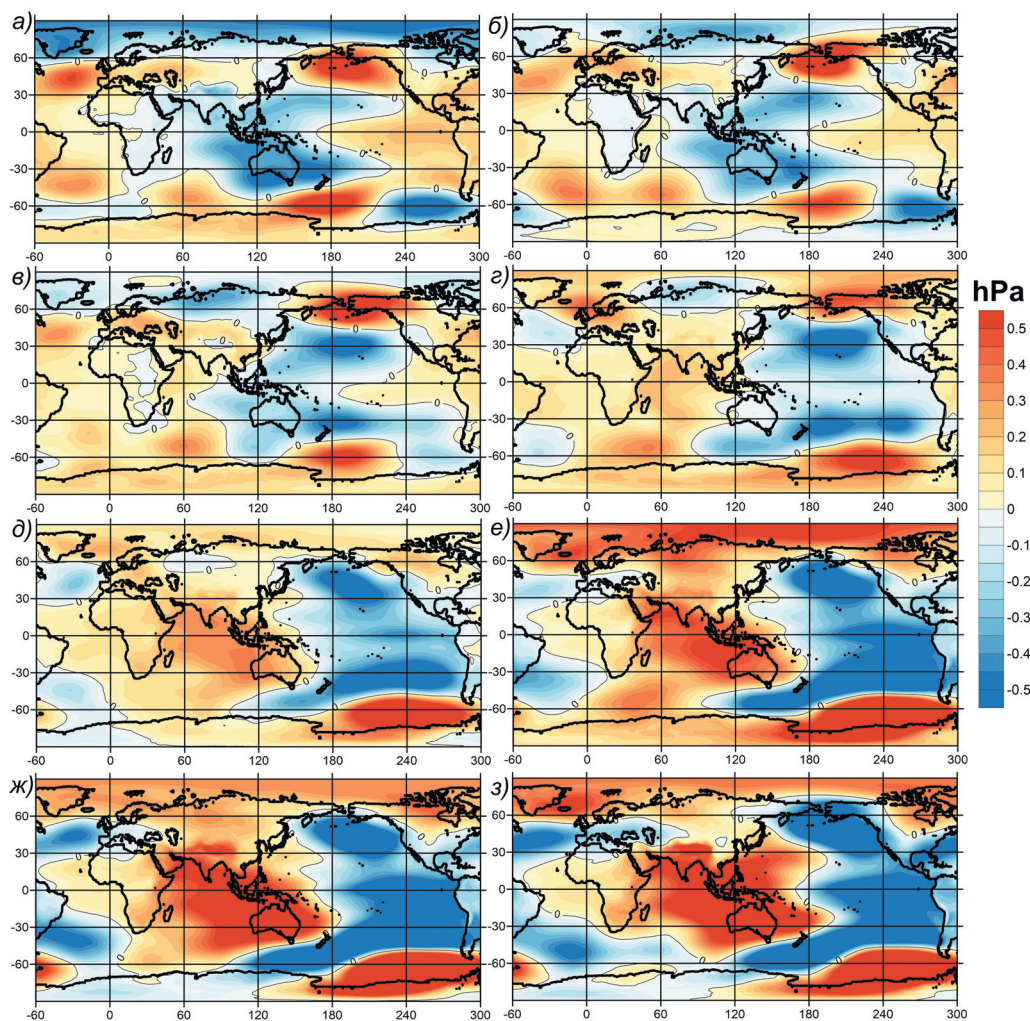


Рис. 4. Средние композиционные поля аномалий ДУМ со сдвигами -14 (а), -12 (б), -10 (в), -8 (г), -6 (д), -4 (е), -2 (ж) и 0 (з) месяцев от максимального развития событий Эль-Ниньо по 58 моделям CMIP6 (эксперимент Historical).

Fig. 4. Average compositional fields of SLP anomalies with shifts -14 (a), -12 (b), -10 (c), -8 (d), -6 (e), -4 (f), -2 (g) and 0 (h) months from maximum of El Niño events for 58 CMIP6 models (Historical experiment).

Эль-Ниньо на 6 месяцев (рис. 3 д), а поля PC2 ДУМ (рис. 2 б) с композиционным полем аномалий ДУМ по индексу PGAO (рис. 5 б). Таким образом, PC2 ДУМ опережает максимумы событий Эль-Ниньо сильнее, чем PC2 ПТВ, что свидетельствует о ведущей роли атмосферы в этом процессе.

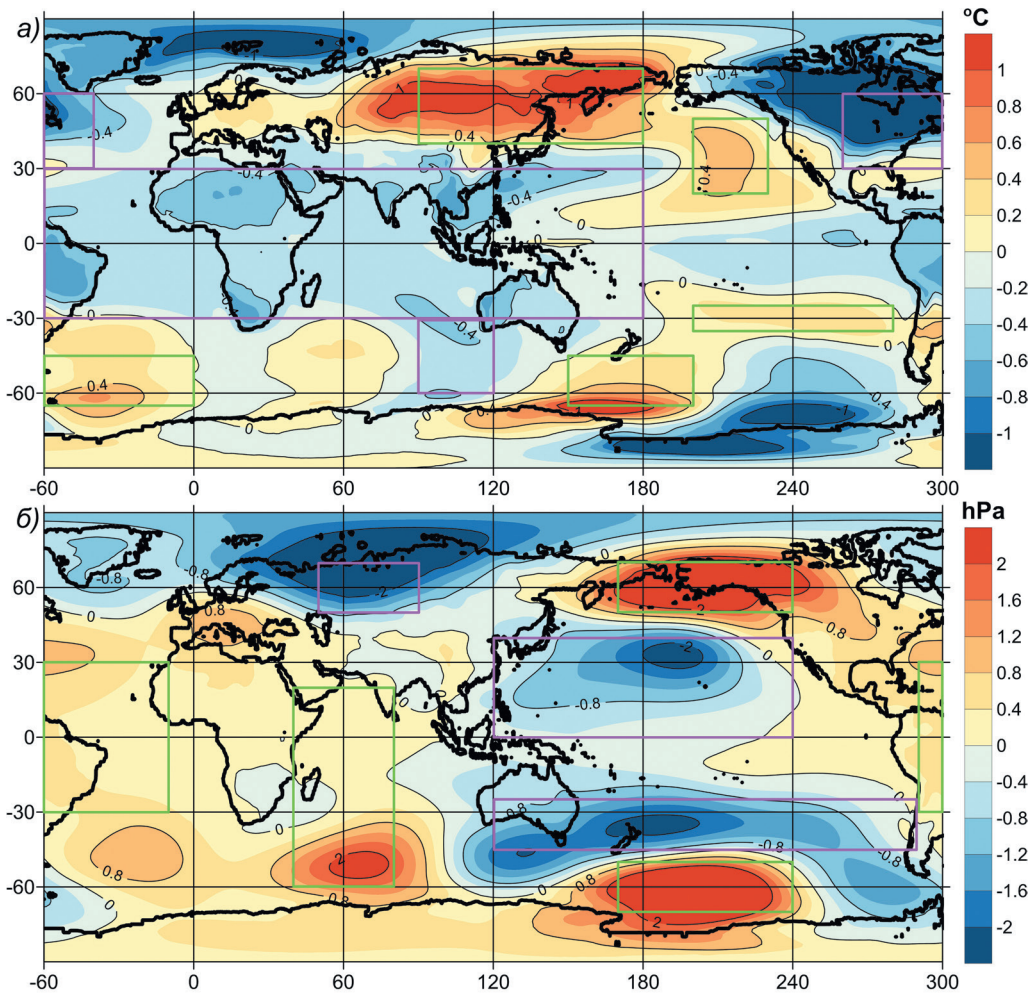


Рис. 5. Средние композиционные поля аномалий ПТВ (а) и ДУМ (б) по индексу PGAO и опережающие приблизительно на 12 месяцев максимум событий Эль-Ниньо по 58 моделям CMIP6 (эксперимент Historical). Зеленым и фиолетовым цветом выделены районы, по которым вычисляется PGAO.

Fig. 5. Average compositional fields of SAT (a) and SLP (b) anomalies by PGAO index and leading by approximately 12 months to the maximum of El Niño events according to 58 CMIP6 models (Historical experiment). The regions for which PGAO is calculated are highlighted in green and purple.

В PGAO входят аномалии как ПТВ, так и ДУМ, поэтому для оценки связей вторых главных компонент с PGAO вычислены максимальные значения кросс-корреляций между суммой модулей EOF2 ПТВ и EOF2 ДУМ (комбинированный EOF2) с PGAO (табл. 3, столбец 2) и сдвиги, которым они соответствуют (табл. 3, столбец 3). Видно, что в основном для отмеченных жирным шрифтом в столбце 1 табл. 3 моделей характерны довольно высокие значения этих корреляций при близком к нулю сдвиге.

Таблица 3

Взаимный спектральный и корреляционный анализ ONI, PGAO и комбинированными для ПТВ и ДУМ их EOF1 и EOF2 (CMIP6 Historical)

Cross spectral and correlation analysis of the ONI, PGAO indices and their EOF1 and EOF2 combined for SAT and SLP (CMIP6 Historical)

Название модели	Макс. корреляция EOF2 и PGAO	Сдвиг EOF2 и PGAO (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и EOF1	Сдвиг EOF2 и EOF1 (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и ONI	Сдвиг EOF2 и ONI (месяцы)	Макс. корреляция PGAO и ONI фильтр от 2 до 7 лет	Сдвиг PGAO и ONI (месяцы)	Когерентность PGAO и ONI периоды от 2 до 7 лет	Фазовые соотношения PGAO и ONI (градусы)
TaiESM1	0,82	1	0,67	-8	0,73	-6	0,84	-11	0,82	-117,3
AWI-CM-1-1-MR	0,35	0	0,37	-6	0,40	-2	0,51	-8	0,72	-29,0
AWI-ESM-1-1-LR	0,36	2	0,66	0	0,52	-2	0,38	-8	0,64	-28,9
BCC-CSM2-MR	-0,11	3	-0,24	0	-0,13	27	0,32	-7	0,73	-33,4
BCC-ESM1	0,30	2	0,42	0	0,20	-3	0,41	-6	0,61	-11,5
CAMS-CSM1-0	0,33	8	0,50	-1	0,49	-1	0,68	-11	0,78	-142,6
CAS-ESM2-0	0,55	1	0,58	-1	0,46	-1	0,71	-8	0,79	-62,6
FGOALS-f3-L	0,48	6	0,57	-7	0,62	-5	0,84	-11	0,79	-139,3
FGOALS-g3	0,20	4	0,48	-1	0,56	-3	0,52	-10	0,73	-33,3
CanESM5	0,25	5	0,50	0	0,43	-2	0,36	-10	0,63	-17,7
CanESM5-CanOE	0,47	1	0,44	-1	0,59	-2	0,58	-9	0,74	-49,8
IITM-ESM	0,67	0	0,46	-7	0,50	-4	-0,61	7	0,78	-139,0
CMCC-CM2-SR5	0,45	2	0,46	-7	0,55	-4	0,70	-12	0,80	-130,4
CMCC-ESM2	0,71	0	0,54	-12	0,61	-8	0,75	-14	0,77	-136,1
CNRM-CM6-1	0,29	7	0,41	-5	0,47	-2	0,59	-10	0,70	-43,6
CNRM-CM6-1-HR	0,27	2	-0,33	12	0,52	-3	-0,58	8	0,74	-128,8
CNRM-ESM2-1	0,28	4	-0,33	11	0,43	-2	0,66	-9	0,78	-47,4
ACCESS-CM2	0,54	1	-0,42	7	0,53	-5	0,68	-9	0,80	-128,1
ACCESS-ESM1-5	0,23	0	-0,33	12	-0,31	15	0,46	-13	0,68	-152,6
E3SM-1-0	0,57	0	0,37	-5	0,43	-4	0,65	-9	0,82	-51,4
E3SM-1-1	0,55	1	0,53	-4	0,52	-3	0,62	-8	0,76	-53,8
E3SM-1-1-ECA	0,37	0	0,30	-7	0,37	-4	0,66	-9	0,80	-41,9

Продолжение табл. 3

Название модели	Макс. корреляция EOF2 и PGO (месяцы)	Сдвиг EOF2 и PGO (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и EOF1 (месяцы)	Сдвиг EOF2 и EOF1 (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и ONI (месяцы)	Сдвиг EOF2 и ONI (месяцы)	Макс. корреляция PGO и ONI фильтр от 2 до 7 лет	Сдвиг PGO и ONI (месяцы)	Когерентность PGO и ONI периоды от 2 до 7 лет	Фазовые соотношения PGO и ONI (градусы)
EC-Earth3	0,39	0	-0,19	15	0,19	-6	0,48	-12	0,75	-128,9
EC-Earth3-AerChem	0,32	0	0,31	-6	0,37	-5	0,57	-9	0,76	-42,6
EC-Earth3-Veg	0,36	0	-0,31	11	0,31	-4	0,61	-12	0,75	-125,7
FIO-ESM-2-0	0,77	0	0,49	-10	0,55	-6	0,74	-10	0,82	-54,3
MPI-ESM-1-2-HAM	0,34	1	0,50	-1	0,45	-3	0,48	-12	0,70	-134,5
INM-CM4-8	0,56	0	-0,22	15	0,46	0	0,14	1	0,65	0,8
INM-CM5-0	0,37	0	-0,17	11	0,14	-5	0,31	-9	0,63	-31,5
IPSL-CM6A-LR	0,21	2	0,46	-1	0,48	-2	0,43	-11	0,66	-23,1
KIOST-ESM	0,30	7	0,41	-4	0,44	-3	-0,72	5	0,70	-143,6
MIROC-ES2L	0,49	1	0,63	-10	0,62	-10	0,81	-17	0,85	-137,8
MIROC6	0,44	1	0,51	-11	0,50	-7	0,76	-15	0,85	-126,7
HadGEM3-GC31-LL	0,39	1	0,41	-1	0,41	-2	0,62	-10	0,76	-50,7
HadGEM3-GC31-MM	0,65	1	0,47	-7	0,55	-5	-0,70	7	0,75	-130,6
UKESM1-0-LL	0,54	1	0,43	-5	0,52	-3	0,69	-9	0,78	-54,9
UKESM1-1-LL	0,49	2	0,48	-3	0,55	-2	0,64	-9	0,75	-133,5
MPI-ESM1-2-HR	0,34	1	0,47	-1	0,47	-5	0,54	-14	0,73	-135,1
MPI-ESM1-2-LR	0,32	1	0,41	-4	0,49	-4	0,51	-14	0,76	-148,0
MRI-ESM2-0	0,38	1	0,36	-7	0,43	-6	0,68	-12	0,79	-119,7
GISS-E2-1-G	-0,47	-12	0,65	-9	0,65	-8	-0,86	6	0,87	-150,6
GISS-E2-1-G-CC	0,41	11	0,60	-8	0,61	-8	-0,86	5	0,87	-145,5
GISS-E2-1-H	0,49	5	0,57	-7	0,65	-6	-0,82	7	0,85	-137,1
GISS-E2-2-H	0,36	0	-0,37	11	0,39	-5	-0,52	10	0,72	-143,8
CESM2	0,77	0	0,56	-8	0,58	-5	-0,72	9	0,82	-117,7
CESM2-FV2	0,75	1	0,69	-8	0,70	-6	0,81	-10	0,81	-46,2
CESM2-WACCM	0,54	0	0,44	-7	0,42	-5	0,68	-11	0,77	-125,8
CESM2-WACCM-FV2	0,71	1	0,67	-7	0,66	-5	0,82	-11	0,79	-130,1
NorCPM1	0,45	1	0,43	-7	0,46	-2	0,73	-9	0,81	-51,2
NorESM2-LM	0,48	0	0,51	-7	0,53	-5	0,81	-12	0,84	-124,8
NorESM2-MM	0,50	0	0,63	-6	0,69	-3	0,72	-12	0,82	-121,9
KACE-1-0-G	0,56	1	0,40	-6	0,52	-4	0,69	-8	0,80	-125,4
GFDL-CM4	0,56	0	0,40	-5	0,48	-4	0,64	-9	0,67	-51,6
GFDL-ESM4	0,28	1	0,32	-5	0,38	-4	0,61	-11	0,78	-34,4
NESM3	0,30	1	0,30	-2	0,35	-3	0,60	-11	0,77	-121,1

Название модели	Макс. корреляция EOF2 и PGO	Сдвиг EOF2 и PGO (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и EOF1	Сдвиг EOF2 и EOF1 (месяцы)	Макс. корреляция EOF2 и ONI	Сдвиг EOF2 и ONI (месяцы)	Макс. корреляция PGO и ONI фильтр от 2 до 7 лет	Сдвиг PGO и ONI (месяцы)	Когерентность PGO и ONI периоды от 2 до 7 лет	Фазовые соотношения PGO и ONI (градусы)
SAM0-UNICON	0,75	0	0,50	-10	0,55	-7	0,72	-10	0,83	-57,1
CIESM	0,39	6	-0,44	15	0,49	-4	0,74	-13	0,86	-125,4
MCM-UA-1-0	0,41	1	-0,25	24	0,20	-6	0,32	-14	0,61	-148,0

Некоторые модели CMIP6 имеют сильные связи между комбинированным EOF1 и EOF2 (табл. 3, столбец 4) при опережении EOF2 более чем на полгода (табл. 3, столбец 5). Также найдены модели CMIP6, которые имеют сильные связи между комбинированным EOF2 и ONI (табл. 3, столбец 6), при опережении EOF2 на несколько месяцев (табл. 3, столбец 7). Но при этом основное значение для заблаговременного прогноза ЭНЮК по ГАО имеет наличие высокой связи между PGO и ONI (табл. 3, столбец 8) при опережении PGO приблизительно на один год (табл. 3, столбец 9). Модели CMIP6 с такими связями были дополнительно определены по когерентности между PGO и ONI (табл. 3, столбец 10) и соответствующим фазовым соотношениям (табл. 3, столбец 11) и отмечены жирным шрифтом в табл. 3, столбец 1.

Все вышеперечисленные относительные оценки связей позволили в итоге выбрать следующие модели CMIP6, с помощью которых можно успешно прогнозировать ЭНЮК по ГАО с заблаговременностью около одного года: **TaiESM1**, **CAMS-CSM1-0**, **CMCC-ESM2**, **FGOALS-f3-L**, **FIO-ESM-2-0**, **MIROC6**, **HadGEM3-GC31-LL**, **MRI-ESM2-0**, **CESM2-FV2**, **NorESM2-LM**, **GFDL-ESM4**, **NESM3**, **SAM0-UNICON**, **CIESM**. Графики кросс-корреляционных функций со сдвигами от -60 до +60 месяцев индексов ONI и PGO для этих моделей и средней для 58 моделей CMIP6 представлены на рис. 6. Эти графики позволяют утверждать, что PGO опережает ONI приблизительно на один год для большинства моделей CMIP6, но при этом между моделями существует заметная разница в возможности прогноза ЭНЮК по ГАО. Так, значения кросс-корреляций со сдвигом приблизительно -1 год для указанных на рис. 6 моделей выше среднемодельных значений всех исследуемых моделей.

Обращает на себя внимание осцилляторная форма графиков кросс-корреляционных функций, представленных на рис. 6, со средним периодом колебания приблизительно 45 месяцев (3,75 года). Это соответствует найденному в [42] максимуму среднемодельного спектра ONI на периоде приблизительно четыре года. Таким образом, на основе полученных результатов, можно заключить, что ONI, GAO1 и PGO являются индексами одного и того же планетарного

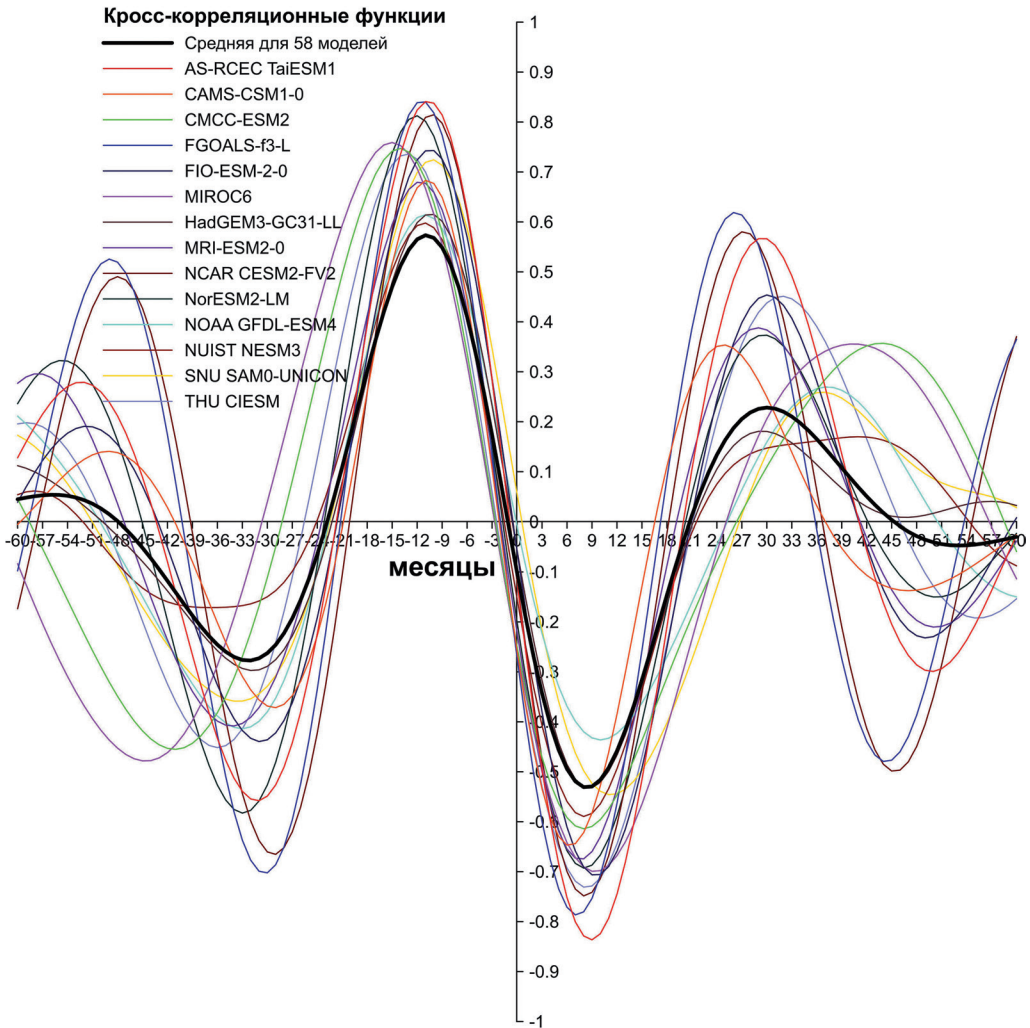


Рис. 6. Кросс-корреляционные функции со сдвигами от -60 до +60 месяцев индексов ONI и PGOA: средняя для 58 моделей CMIP6 (черный); отдельно для моделей TaiESM1, CAMS-CSM1-0, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, FIO-ESM-2-0, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL, MRI-ESM2-0, CESM2-FV2, NorESM2-LM, GFDL-ESM4, NESM3, SAM0-UNICON, CIESM (эксперимент Historical). PGOA опережает ONI при отрицательных сдвигах.

Fig. 6. Cross-correlation functions with shifts from -60 to +60 months of the ONI and PGOA indices: average for 58 CMIP6 models (black); separately for models TaiESM1, CAMS-CSM1-0, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, FIO-ESM-2-0, MIROC6, HadGEM3-GC31-LL, MRI-ESM2-0, CESM2-FV2, NorESM2-LM, GFDL-ESM4, NESM3, SAM0-UNICON, CIESM (Historical experiment). PGOA outperforms ONI at negative shifts.

процесса, названного в [33] ГАО и включающего ЭНЮК в качестве одного из своих элементов. Причем существенная часть из рассмотренных моделей CMIP6 воспроизводит как саму планетарную структуру ГАО, так и ее западно-восточное распространение, благодаря чему есть возможность прогнозировать ЭНЮК на основе этих моделей с преодолением весеннего предела предсказуемости.

В качестве примера приведены графики ONI и PGAO за 1900-2014 гг. эксперимента Historical моделей TaiESM1, CMCC-ESM2, FGOALS-f3-L, MIROC6, CESM2-FV2 и NorESM2-LM (рис. 7). На этих графиках видно, что практически всюду максимумы PGAO опережают максимумы ONI (события Эль-Ниньо), а минимумы PGAO опережают минимумы ONI (события Ла-Нинья). Особенно это опережение характерно для сильных событий. Это позволяет использовать PGAO в качестве предиктора ЭНЮК в выбранных моделях CMIP6. Тем не менее, наблюдаются периоды, когда события Эль-Ниньо и Ла-Нинья ослабевают, при этом падает и прогностическая способность PGAO.

Заключение

По результатам моделей CMIP6 построены поля первой и второй главных компонент межгодовой глобальной изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ и исследованы связи между ними. Оказалось, что первые главные компоненты исследуемых моделей связаны с ЭНЮК, а вторые с фазой ГАО, которая на несколько месяцев опережает события Эль-Ниньо. Такое опережение характерно для сильных событий. В тоже время наблюдаются периоды, когда события Эль-Ниньо и Ла-Нинья ослабевают, вследствие чего падает прогностическая способность PGAO. В связи с этим естественно считать, что PGAO может использоваться для прогноза локальных экстремумов (максимумов и минимумов) ЭНЮК в выбранных моделях CMIP6 пока что на качественном уровне. Очевидно, для оценки их реальной прогностической эффективности необходимо построение конкретных статистических моделей прогноза ЭНЮК.

Оценены величины связей EOF1 и EOF2 межгодовой глобальной изменчивости аномалий ПТВ и ДУМ с индексами ЭНЮК и ГАО. Определены модели CMIP6 имеющие сильные связи EOF1 с индексом ЭНЮК ONI и индексом ГАО GAO1. Также найдены те модели CMIP6, комбинированные EOF2 которых имеют сильные связи с индексом-предиктором PGAO, с помощью которого можно заблаговременно прогнозировать события Эль-Ниньо и Ла-Нинья на основе западно-восточного распространения пространственной структуры ГАО.

На основе анализа выявленных связей между ONI и PGAO выбраны следующие модели CMIP6, которые позволяют прогнозировать ЭНЮК по ГАО с заблаговременностью приблизительно один год: AS-RCEC TaiESM1, CAMS CAMS-CSM1-0, CMCC CMCC-ESM2, CAS FGOALS-f3-L, FIO-QLNM FIO-ESM-2-0, MIROC MIROC6, MOHC HadGEM3-GC31-LL, MRI MRI-ESM2-0, NCAR CESM2-FV2, NCC NorESM2-LM, NOAA GFDL-ESM4, NUIST NESM3, SNU SAM0-UNICON, THU CIESM.

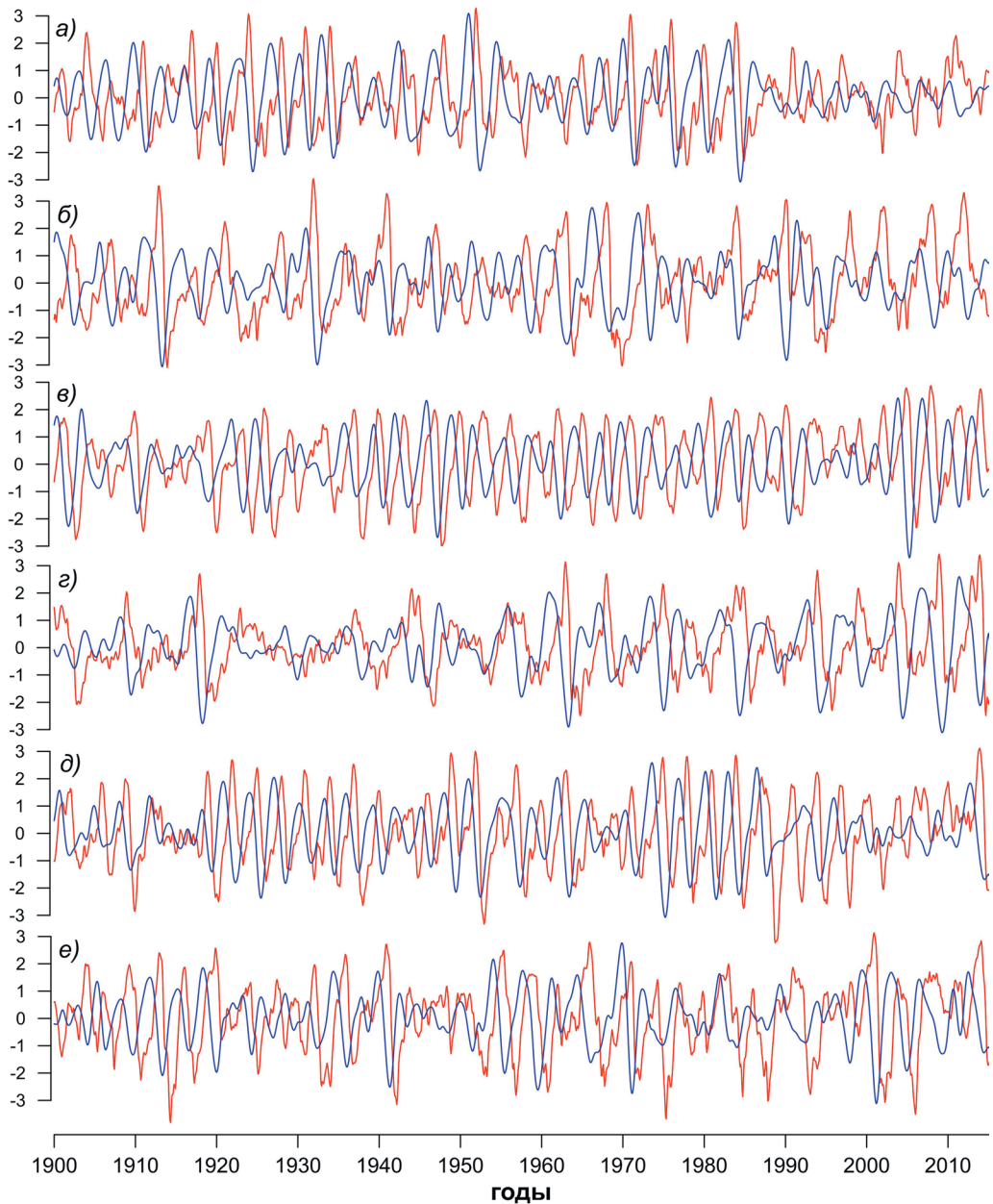


Рис. 7. Сопоставление индексов ONI (красный) и PGO (синий) за 1900—2014 гг. эксперимента Historical моделей CMIP6: TaiESM1 (а), CMCC-ESM2 (б), FGOALS-f3-L (в), MIROC6 (г), CESM2-FV2 (д) и NorESM2-LM (е).

Fig. 7. ONI (red) and PGO (blue) indices for 1900–2014 of the Historical experiment of the CMIP6 models: TaiESM1 (a), CMCC-ESM2 (б), FGOALS-f3-L (в), MIROC6 (г), CESM2-FV2 (д) and NorESM2-LM (е).

Список литературы

1. L'Heureux M. L., Levine A. F. Z., Newman M. et al. ENSO Prediction. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate* (eds M.J. McPhaden, A. Santoso and W. Cai). American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Balmaseda M. A., Davey M. K., Anderson D. L. T. Decadal and Seasonal Dependence of ENSO Prediction Skill // *J. Climate*. 1995. Vol. 8. P. 2705—2715. DOI: 10.1175/1520-0442(1995)008<2705:DAS-DOE>2.0.CO;2.
3. Xue Y., Leetmaa A., Ji M. ENSO Prediction with Markov Models: The Impact of Sea Level // *J. Climate*. 2000. Vol. 13. P. 849—871.
4. Barnston A. G., Tippett M. K., L'Heureux M. L. et al. Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002–11: Is Our Capability Increasing? // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012. Vol. 93. P. 631—651. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00111.2.
5. Webster P. J., Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1992. Vol. 118. P. 877—926.
6. Torrence C., Webster P. J. The Annual Cycle of Persistence in the El Niño–Southern Oscillation // *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1998. Vol. 124. P. 1985—2004.
7. McPhaden M. J. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30. 1480. doi: 10.1029/2003GL016872.
8. Duan W., Wei C. The ‘spring predictability barrier’ for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model // *Int. J. Climatol.* 2013. Vol. 33. P. 1280—1292. DOI: 10.1002/joc.3513.
9. Webster P. J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system // *Meteor. Atmos. Phys.* 1995. Vol. 56. P. 33—55.
10. Latif M., Barnett T. P., Cane M. A. et al. A review of ENSO prediction studies // *Climate Dynamics*. 1994. Vol. 9. P. 167—179.
11. Latif M., Anderson D., Barnett T. et al. A review of the predictability and prediction of ENSO // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103(C7). P. 14375—14393.
12. Tang Y., Zhang R. H., Liu T. et al. Progress in ENSO prediction and predictability study // *National Science Review*. 2018. Vol. 5. P. 826—839. DOI: 10.1093/nsr/nwy105.
13. Железнова И. В., Гущина Д. Ю., Коленникова М. А. Оценка изменения вклада основных предикторов в прогноз Эль-Ниньо в последние десятилетия на основе простой статистической модели // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. Т. 1. С. 42—64. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-1-42-64.
14. Mukhin D., Gavrilov A., Seleznev A., Buyanova M. An atmospheric signal lowering the spring predictability barrier in statistical ENSO forecasts // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. e2020GL091287. DOI:10.1002/essoar.10504537.2.
15. Zheng Y., Chen W., Chen S. Intermodel spread in the impact of the springtime Pacific meridional mode on following-winter ENSO tied to simulation of the ITCZ in CMIP5/CMIP6 // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. e2021GL093945. DOI:10.1002/essoar.10504537.2.
16. Fan H., Yang S., Wang C. et al. Strengthening Amplitude and Impact of the Pacific Meridional Mode on ENSO in the Warming Climate Depicted by CMIP6 Models // *J. Climate*. 2022. Vol. 35. P. 5195—5213. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0683.1.
17. Martín-Rey M., Rodríguez-Fonseca B., Polo I. Atlantic opportunities for ENSO prediction // *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 6802—6810.
18. Luo J., Masson S., Behera S. K., Yamagata T. Extended ENSO Predictions Using a Fully Coupled Ocean–Atmosphere Model // *J. Climate*. 2008. Vol. 21. P. 84—93. DOI: 10.1175/2007JCLI1412.1.
19. Tziperman E., Yu L. Quantifying the Dependence of Westerly Wind Bursts on the Large-Scale Tropical Pacific SST // *Journal of Climate*. 2007. Vol. 20 (12). P. 2760—2768. DOI: 10.1175/JCLI4138a.1.
20. IRI ENSO Predictions Plume. Available at: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/> (accessed on: 09.06.2024).
21. Barnston A. G., Tippett M. K., van den Dool H. M., Unger D. A. Toward an Improved Multimodel ENSO Prediction // *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2015. Vol. 54. P. 1579—1595. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0188.1.

22. Barnston A. G., Tippett M. K., Ranganathan M. et al. Deterministic skill of ENSO predictions from the North American Multimodel Ensemble // *Clim. Dyn.* 2019. Vol. 53. P. 7215—7234. DOI: 10.1007/s00382-017-3603-3.
23. Kirtman B. P., Min D. Multimodel Ensemble ENSO Prediction with CCSM and CFS // *Mon. Wea. Rev.* 2009. Vol. 137. P. 2908—2930. DOI: 10.1175/2009MWR2672.1.
24. Zhou L., Zhang R. H. A Hybrid Neural Network Model for ENSO Prediction in Combination with Principal Oscillation Pattern Analyses // *Adv. Atmos. Sci.* 2022. Vol. 39. P. 889—902. DOI: 10.1007/s00376-021-1368-4.
25. Лубков А. С., Воскресенская Е. Н., Марчукова О. В. Применение нейронных сетей для прогноза явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов // *Метеорология и гидрология*. 2020. Т. 45. № 11. С. 111—121.
26. Hassanibesheli F., Kurths J., Boers N. Long-term ENSO prediction with echo-state networks // *Environ. Res.: Climate*. 2022. Vol. 1. 011002. DOI:10.1088/2752-5295/ac7f4c.
27. Gavrilov A., Seleznev A., Mukhin D. et al. Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast // *Clim. Dyn.* 2019. Vol. 52. P. 2199—2216. DOI:10.1007/s00382-018-4255-7.
28. Zheng Y., Rugenstein M., Pieper P. et al. El Niño–Southern Oscillation (ENSO) predictability in equilibrated warmer climates // *Earth Syst. Dynam.* 2022. Vol. 13. P. 1611—1623. DOI: 10.5194/esd-13-1611-2022.
29. Beverley J. D., Newman M., Hoell A. Rapid development of systematic ENSO-related seasonal forecast errors // *Geophysical Research Letters*. 2023. Vol. 50. e2022GL102249. DOI: 10.1029/2022GL102249.
30. Kirtman B. P. The COLA Anomaly Coupled Model: Ensemble ENSO Prediction // *Mon. Wea. Rev.* 2003. Vol. 131. P. 2324—2341. DOI: 10.1175/1520-0493(2003)131<2324:TCACME>2.0.CO;2.
31. Yan J., Mu L., Wang L. et al. Temporal Convolutional Networks for the Advance Prediction of ENSO // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10. 8055. DOI: 10.1038/s41598-020-65070-5.
32. Ineson S., Balmaseda M. A., Davey M. K. et al. Predicting El Niño in 2014 and 2015 // *Sci. Rep.* 2018. Vol. 8. 10733. DOI: 10.1038/s41598-018-29130-1.
33. 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.
34. 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. DOI: 10.7868/S0030157416020039.
35. Серых И. В. О динамике и структуре Глобальной атмосферной осцилляции в климатических моделях и реальности // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 1. С. 14—28. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2.
36. 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. DOI: 10.1007/s00024-019-02182-8.
37. 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.
38. Серых И. В. О роли Эль-Ниньо – Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов. *Гидрометеорология и экология*. 2021. № 63. С. 329—370. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370.
39. 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. DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>.
40. Вакуленко Н. В., Серых И. В., Сонечкин Д. М. Хаос и порядок в атмосферной динамике. Часть 3. Предсказуемость Эль-Ниньо // *Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика*. 2018. Т. 26. № 4. С. 75—94. DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>.
41. Serykh I. V., Sonechkin D. M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation // *International Journal of Climatology*. 2021. Vol. 41. P. 3781—3792. DOI: 10.1002/joc.6488.

42. 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.
43. 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. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
44. 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. DOI: 10.1007/s00704-018-02761-0.
45. Mukhin D., Gavrilov A., Feigin A. et al. Principal nonlinear dynamical modes of climate variability // *Nature Scientific Reports*. 2015. Vol. 5. 15510. DOI: 10.1038/srep15510

References

1. L'Heureux M. L., Levine A. F. Z., Newman M. et al. ENSO Prediction. In *El Niño Southern Oscillation in a Changing Climate* (eds M. J. McPhaden, A. Santoso and W. Cai). American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 2020: 506 p.
2. Balmaseda M. A., Davey M. K., Anderson D. L. T. Decadal and Seasonal Dependence of ENSO Prediction Skill. *J. Climate*. 1995;(8): 2705—2715. DOI: 10.1175/1520-0442(1995)008<2705:DAS-DOE>2.0.CO;2.
3. Xue Y., Leetmaa A., Ji M. ENSO Prediction with Markov Models: The Impact of Sea Level. *J. Climate*. 2000;(13): 849—871.
4. Barnston A. G., Tippett M. K., L'Heureux M. L., Li S., DeWitt D. G. Skill of Real-Time Seasonal ENSO Model Predictions during 2002–11: Is Our Capability Increasing? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2012;(93): 631—651. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00111.2.
5. Webster P. J., Yang S. Monsoon and ENSO: Selectively Interactive Systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1992;(118): 877—926.
6. Torrence C., Webster P. J. The Annual Cycle of Persistence in the El Niño-Southern Oscillation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1998;(124): 1985—2004.
7. McPhaden M. J. Tropical Pacific Ocean heat content variations and ENSO persistence barriers. *Geophys. Res. Lett.* 2003;(30): 1480. doi: 10.1029/2003GL016872.
8. Duan W., Wei C. The 'spring predictability barrier' for ENSO predictions and its possible mechanism: results from a fully coupled model. *Int. J. Climatol.* 2013;(33): 1280—1292. DOI: 10.1002/joc.3513.
9. Webster P. J. The annual cycle and the predictability of the tropical coupled ocean-atmosphere system. *Meteor. Atmos. Phys.* 1995;(56): 33—55.
10. Latif M., Barnett T. P., Cane M. A. et al. A review of ENSO prediction studies. *Climate Dynamics*. 1994;(9): 167—179.
11. Latif M., Anderson D., Barnett T. et al. A review of the predictability and prediction of ENSO. *J. Geophys. Res.* 1998;(103): 14375—14393.
12. Tang Y., Zhang R. H., Liu T. et al. Progress in ENSO prediction and predictability study. *National Science Review*. 2018;(5): 826—839. DOI: 10.1093/nsr/nwy105.
13. Zheleznova I. V., Gushchina D. Yu., Kolennikova M. A. Evaluation of contribution of major El Niño predictors to its forecasts during the last decades based on a simple statistical model. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2020;(1): (42—64). (In Russ.). DOI: 10.21513/2410-8758-2020-1-42-64.
14. Mukhin D., Gavrilov A., Seleznev A., Buyanova M. An atmospheric signal lowering the spring predictability barrier in statistical ENSO forecasts. *Geophysical Research Letters*. 2021;(48): e2020GL091287. DOI: 10.1002/essoar.10504537.2.
15. Zheng Y., Chen W., Chen S. Intermodel spread in the impact of the springtime Pacific meridional mode on following-winter ENSO tied to simulation of the ITCZ in CMIP5/CMIP6. *Geophysical Research Letters*. 2021;(48): e2021GL093945. DOI: 10.1002/essoar.10504537.2.
16. Fan H., Yang S., Wang C. et al. Strengthening Amplitude and Impact of the Pacific Meridional Mode on ENSO in the Warming Climate Depicted by CMIP6 Models. *J. Climate*. 2022;(35): 5195—5213. DOI: 10.1175/JCLI-D-21-0683.1.

17. Martín-Rey M., Rodríguez-Fonseca B., Polo I. Atlantic opportunities for ENSO prediction. *Geophys. Res. Lett.* 2015;(42): 6802—6810.
18. Luo J., Masson S., Behera S. K., Yamagata T. Extended ENSO Predictions Using a Fully Coupled Ocean–Atmosphere Model. *J. Climate*. 2008;(21): 84—93. DOI: 10.1175/2007JCLI1412.1.
19. Tziperman E., Yu L. Quantifying the Dependence of Westerly Wind Bursts on the Large-Scale Tropical Pacific SST. *Journal of Climate*. 2007;(20): 2760—2768. DOI: 10.1175/JCLI4138a.1.
20. IRI ENSO Predictions Plume. Available at: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/current/> (accessed on: 09.06.2024).
21. Barnston A. G., Tippett M. K., van den Dool H. M., Unger D. A. Toward an Improved Multimodel ENSO Prediction. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2015;(54): 1579—1595. DOI: 10.1175/JAMC-D-14-0188.1.
22. Barnston A. G., Tippett M. K., Ranganathan M. et al. Deterministic skill of ENSO predictions from the North American Multimodel Ensemble. *Clim. Dyn.* 2019;(53): 7215—7234. DOI: 10.1007/s00382-017-3603-3.
23. Kirtman B. P., Min D. Multimodel Ensemble ENSO Prediction with CCSM and CFS. *Mon. Wea. Rev.* 2009;(137): 2908—2930. DOI: 10.1175/2009MWR2672.1.
24. Zhou L., Zhang R. H. A Hybrid Neural Network Model for ENSO Prediction in Combination with Principal Oscillation Pattern Analyses. *Adv. Atmos. Sci.* 2022;(39): 889—902. DOI: 10.1007/s00376-021-1368-4.
25. Lubkov A. S., Voskresenskaya E. N., Marchukova O. V. Forecasting El Niño/La Niña and their types using neural networks. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020;(45): 806—813.
26. Hassanibesheli F., Kurths J., Boers N. Long-term ENSO prediction with echo-state networks. *Environ. Res.: Climate*. 2022;(1): 011002. DOI: 10.1088/2752-5295/ac7f4c.
27. Gavrilov A., Seleznev A., Mukhin D. et al. Linear dynamical modes as new variables for data-driven ENSO forecast. *Clim. Dyn.* 2019;(52): 2199—2216. DOI: 10.1007/s00382-018-4255-7.
28. Zheng Y., Rugenstein M., Pieper P. et al. El Niño–Southern Oscillation (ENSO) predictability in equilibrated warmer climates. *Earth Syst. Dynam.* 2022;(13): 1611—1623. DOI: 10.5194/esd-13-1611-2022.
29. Beverley J. D., Newman M., Hoell A. Rapid development of systematic ENSO-related seasonal forecast errors. *Geophysical Research Letters*. 2023;(50): e2022GL102249. DOI: 10.1029/2022GL102249.
30. Kirtman B. P. The COLA Anomaly Coupled Model: Ensemble ENSO Prediction. *Mon. Wea. Rev.* 2003;(131): 2324—2341. DOI: 10.1175/1520-0493(2003)131<2324:TCACME>2.0.CO;2.
31. Yan J., Mu L., Wang L. et al. Temporal Convolutional Networks for the Advance Prediction of ENSO. *Sci. Rep.* 2020;(10): 8055.
32. Ineson S., Balmaseda M. A., Davey M. K. et al. Predicting El Niño in 2014 and 2015. *Sci. Rep.* 2018;(8): 10733. DOI: 10.1038/s41598-018-29130-1.
33. 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).
34. 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). (In Russ.). DOI: 10.7868/S0030157416020039.
35. 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.). DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(1).2.
36. 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. DOI: 10.1007/s00024-019-02182-8.
37. 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.
38. 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 (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University)*. 2021;(63): (329—370). (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370.
39. 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.). DOI: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>.
40. Vakulenko N. V., Serykh I. V., Sonechkin D. M. Chaos and order in atmospheric dynamics. Part 3. Predictability of El Nino. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy = Prikladnaya nelineynaya dinamika. Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*. 2018;(26): (75—94). (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-4-75-94>.
 41. Serykh I. V., Sonechkin D. M. El Niño forecasting based on the global atmospheric oscillation. *International Journal of Climatology*. 2021;(41): 3781—3792. DOI: 10.1002/joc.6488.
 42. 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.
 43. 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. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
 44. 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. DOI: 10.1007/s00704-018-02761-0.
 45. Mukhin D., Gavrilov A., Feigin A. et al. Principal nonlinear dynamical modes of climate variability. *Nature Scientific Reports*. 2015;(5): 15510. DOI: 10.1038/srep15510.

Информация об авторе

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

Information about author

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

Статья поступила 13.06.2024

Принята к печати 16.08.2024

The article was received on 13.06.2024

The article was accepted on 16.08.2024