ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОВТОРЯЕМОСТИ СОБЫТИЙ ЭЛЬ-НИНЬО И ЛА-НИНЬЯ К КОНЦУ ХХІ ВЕКА ПО МОДЕЛЯМ ПРОЕКТА СМІР6

Е.Н. Воскресенская¹, О.В. Марчукова¹, В.В. Афанасьева²

¹Институт природно-технических систем,
РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

²Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе
РФ, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7
E-mail: elena_yoskr@mail.ru

Проведена оценка качества воспроизведения аномалий ТПО в экваториальной зоне Тихого океана при Эль-Ниньо (ЭН) и Ла-Нинья (ЛН) в моделях проекта СМІР6 (KIOST-ESM, MIROC-ES2L и INM-CM4-8) путем сравнения с реальными событиями в период с 1950 по 2014 гг. по данным массива ERSSTv5. Показано, что ансамблевая оценка количества, интенсивности и продолжительности ЭН и ЛН достаточно хорошо соответствует реальным условиям. На этом основании проведены соответствующие ансамблевые расчеты их будущих возможных изменений в период 2021–2085 гг. относительно исторического периода 1950–2014 гг. для двух возможных сценариев: оптимального (SSP2-4.5) и крайне неблагоприятного (SSP5-8.5).

Ключевые слова: Эль-Ниньо, Ла-Нинья, СМІР6, температура поверхности океана, долгосрочный прогноз.

Поступила в редакцию: 15.11.2021. После доработки: 10.12.2021.

Введение. События Эль-Ниньо (ЭН) и Ла-Нинья (ЛН) оказывают существенное влияние на изменение климата и окружающей среды на межгодовом масштабе [1, 2]. При этом региональные отклики этих глобальных событий в виде климатических, зачастую катастрофических аномалий обуславливают серьезные негативные экономические последствия. Особенности эволюции и повторяемости этих событий в экваториальной части Тихого океана достаточно подробно описаны [3–7]. Имеются некоторые успешные попытки заблаговременного прогноза наступления ЭН и ЛН, например, [8]. Однако для перспективного планирования устойчивого развития регионов необходимо долгосрочное прогнозирование повторяемости событий.

В 1995 г. под эгидой Рабочей группы по сопряжённому моделированию (WGCM) был создан проект СМІР (Coupled Model Intercomparison Project), объединивший в себе ряд математических моделей, предназначенных для прогнозирования будущих климатических изменений [9]. Модели этого проекта позволяют воспроизвести не только климатические

поля и годовой цикл, но также межгодовую изменчивость гидрометеорологических характеристик в тропиках без коррекции потоков тепла и влаги на границе океан – атмосфера [9, 10]. Дополнительно проект СМІР дает возможность проследить изменения в океане и атмосфере и предсказать будущий климат при различных сценариях антропогенного загрязнения атмосферы. На данный момент проект находится на шестом этапе развития [9].

Для шестого международного проекта климатических моделей СМІР6 в рамках Всемирной программы по исследованию климата (World Climate Research Programme – WCRP) был разработан новый набор сценариев, которые отражают различные социально-экономические изменения, а также пути антропогенного изменения концентрации парниковых газов в атмосфере [11]. Это пять, так называемых, социально-экономических вариантов развития общества SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Новые сценарии включают в себя климатические изменения, которые были заложены в основу предыдущего проекта СМІР5 и носили

названия RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5 [12].

Открытым является вопрос качества воспроизведения моделями CMIP6 событий ЭНЮК. Так как до конца не известен «спусковой» механизм образования этого феномена, интересно было бы сравнить, как в некоторых моделях решена задача выявления эпизодов ЭН и ЛН. Равным образом важно, могут ли модели спрогнозировать события на ближайшее будущее в условиях изменения климата и выявить взаимосвязи между ними и антропогенным воздействием. Поэтому **цель** настоящей работы – сравнить результаты воспроизведения ЭН и ЛН в моделях проекта CMIP6 с исторически зарегистрированными событиями и получить возможные прогнозные оценки воспроизведения этих событий и их повторяемости к концу XXI века.

Данные и методы. В настоящей работе для определения существующих событий ЭНЮК используется массив ERSSTv5 [13] с 1854 по 2019 гг. с пространственным разрешением сетки $2^\circ \times 2^\circ$.

Для анализа ЭН и ЛН по модельным данным проекта CMIP6 используются следующие модели:

- INM-CM4-8, KIOST-ESM и MIROC-ES2L [14].
- INM-CM4-8 – климатическая модель, разработанная Институтом вычислительной математики РАН.
- KIOST-ESM – климатическая модель, разработанная Корейским институтом океанологии и технологий.
- MIROC-ES2L – модель междисциплинарных исследований климата, разработанная исследователями Японии.

Перечисленные выше модели принимали участие в различных исследованиях, посвященных проблемам изменения климата [15], для выявления тенденций засухи в Австралии и Азиатском регионе [16], неоднократно использовались для наблюдения за аномалиями ТПО и ростом концентрации углекислого газа в океане и атмосфере [17]. Однако, эти три модели, практически не задействовались анализе эпизодов ЭНЮК.

Для выделения событий ЭН и ЛН по модельным данным проекта CMIP6 и массиву ERSSTv5 был выбран оптимальный

критерий согласно работе [18], при котором пороговое значение аномалии температуры поверхности океана (АТПО) в районе Nino3.4 ($5^\circ \text{с.ш.} - 5^\circ \text{ю.ш.}$ и $170^\circ \text{з.д.} - 120^\circ \text{з.д.}$) составляет $\pm 0,5^\circ \text{C}$, а минимальная продолжительность события (П) равна или больше 5 месяцев. В общем виде условие для выделения событий фаз ЭНЮК выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{АТПО Nino3.4} &\leq \pm 0,5^\circ \text{C} \\ \text{П} &\geq 5 \text{ мес.} \end{aligned}$$

Для сравнения реальных событий ЭНЮК с модельными данными был выбран период с 1950 по 2014 гг., относительно которого рассчитывались аномалии ТПО с учетом исключения сезонной изменчивости и линейного тренда. Для того чтобы выделить сезонную изменчивость, необходимо рассчитать среднемесячные значения $\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau)$ по всему временному ряду для каждого месяца:

$$\tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau) = \sum_{i=0}^{n-1} F(\varphi, \lambda, z_0, \tau + 12i),$$

где φ – широта, λ – долгота, z_0 – глубина 0 м, $\tau = 1, 2, \dots, 12$ месяцы года, а n – количество лет наблюдений рассматриваемого нами временного интервала (в данном случае 65 лет). Далее можно провести вычисления ежемесячных аномалий $\delta \tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t)$ относительно полученной сезонной изменчивости:

$$\begin{aligned} \delta \tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, t) &= F(\varphi, \lambda, z_0, \tau) \\ &- \tilde{F}(\varphi, \lambda, z_0, \tau). \end{aligned}$$

Оценка возможных изменений повторяемости событий ЭН и ЛН в будущем по моделям CMIP6 рассчитывалась для двух сценариев: оптимального (SSP2-4.5) и крайне неблагоприятного (SSP5-8.5). SSP2-4.5 – это, по сути, обновленный сценарий RCP4.5, соответствующий средним из всех возможных путей социально-экономического развития и представляется оптимальным. При SSP2-4.5 радиационное воздействие к 2100 г. будет составлять $4,5 \text{ Вт/м}^2$, а концентрация CO_2 достигнет отметки 600 ppm [12]. Этот сцена-

рий предполагает, что будут приняты меры по защите климата. SSP5-8.5 – это крайний сценарий, который считается самым неблагоприятным. Радиационное воздействие к 2100 г.у при таком сценарии составляет 8,5 Вт/м², а концентрация парниковых газов – 1100 ppm [12].

Полученные результаты. На первом этапе работы решалась задача сравнения модельных данных ТПО проекта CMIP6 с данными реконструированного массива ТПО – ERSSTv5 – для периода с 1950 по 2014 гг. Для этого были проводился корреляционный анализ и сравнение линейных трендов в экваториальной зоне Тихо-

го океана в районе Nino3.4. Корреляционный анализ модельных данных с реальными не выявил сходств (коэффициенты корреляции (r) близки к нулю). Поэтому был проведён сравнительный анализ коэффициентов линейного тренда с учетом знака за десять лет (табл. 1). Наиболее близкий по значениям коэффициент линейного тренда данных ERSSTv5 ($Tr=0,06^{\circ}C/10$ лет) с данными модели MIROC-ES2L ($Tr=0,09^{\circ}C/10$ лет), в то время как модель INM-CM4-8 демонстрирует занижение коэффициента, а модель KIOST-ESM его завышение (табл. 1).

Таблица 1. Сравнительные оценки величин линейных трендов (Tr) по модельным данным ТПО проекта CMIP6 за 10 лет с реальными данными (ERSSTv5) в регионе Nino3.4 в период с 1950 по 2014 гг.

Массив/Модель	Tr ($^{\circ}C/10$ лет)
ERSSTv5	0,06
INM-CM4-8	0,02
MIROC-ES2L	0,09
KIOST-ESM	0,20

Далее был выполнен более углубленный сравнительный анализ реальных данных с модельными, по которому оценивалось количество выделенных событий ЭН и ЛН, их средняя продолжительность (Π) и средняя интенсивность (I) за исторический период с 1950 по 2014 гг. (табл. 2, 3). Это позволило проверить достоверность выделенных фаз ЭНЮК моделями CMIP6, с целью выбора лучшей модели для получения дальнейшей прогностической оценки. Из данных массива ERSSTv5 следует, что в период с 1950 по 2014 гг. произошло 20 реальных событий ЭН (табл. 2) и 10 событий ЛН (табл. 3). Результаты анализа обнаруженных моделями явлений ЭНЮК за исторический период показывают следующее: модель KIOST-ESM выявила 21 событие ЭН и 19 событий ЛН, модель INM-CM4-8 – 5 ЭН и 6 ЛН, модель MIROC-ES2L – 17 событий ЭН и 16 ЛН. Необходимо подчеркнуть, что данные моделей выделенных фаз ЭНЮК значительно отличаются от данных ERSSTv5 по характеристикам самих явлений: продолжительности, интенсивности и месяца начала события. Модель KIOST-ESM вы-

ражено завышает количество ЛН на 42%, а их среднюю интенсивность на $-0,61^{\circ}C$ ($\sim 31\%$) (табл. 3), при этом в случае с ЭН количество отличается лишь на одно событие, а средняя интенсивность выше всего на 23,5% (табл. 2). Модель MIROC-ES2L существенно завышает показатели средней интенсивности явлений ЭНЮК (на 47% в случае ЭН, и на 37,6% в случае ЛН) и средней продолжительности ($\sim 30\%$). Модель INM-CM4-8 в отличие от KIOST-ESM и MIROC-ES2L, наоборот, занижает все показатели. Среднее количество событий ЭН за период с 1950 по 2014 гг. меньше на 75% (табл. 2), а событий ЛН – на 45% (табл. 3).

Полученные результаты сравнения по трём моделям CMIP6 указывают на то, что неоднозначность их результатов в показателях количества ЭН и ЛН, средней интенсивности и продолжительности событий не определяет лучшую модель для долгосрочного прогноза. Поэтому следует анализировать ансамбль моделей, чтобы получить более правдоподобные результаты, так как усреднение моделей выравнивает баланс между ними и не выдает

завышенных или заниженных показателей ЭН и ЛН. В табл. 3 продемонстрировано хорошее совпадение в количестве событий ЛН и их средней продолжительности при расчете ансамбля моделей CMIP 6. Однако количество ЭН все-таки остается заниженным на 30% за счет модели INM-

CM4-8, в которой явно не усвоен механизм определения теплых эпизодов ЭНЮК. Важно отметить, что, несмотря на хорошие результаты в количестве и средних характеристиках ЭН и ЛН, ансамбль моделей CMIP6 не может воспроизвести точные фазы начала этих событий (рис. 1).

Таблица 2. Сравнительные оценки количества выделенных событий ЭН и их характеристик за исторический период с 1950 по 2014 гг. по данным наблюдений (серая заливка), трёх моделей CMIP6 и их ансамблю

Название	Количество ЭН	Сред. И (°C)	Сред. П (мес.)
KIOST-ESM	21	1,91	14
MIROC-ES2L	17	2,79	17
INM-CM4-8	5	1,06	13
ERSSTv5	20	1,46	12
Ансамбль	14	1,29	13

Таблица 3. Сравнительные оценки количества выделенных событий ЛН и их характеристик за исторический период с 1950 по 2014 гг. по данным наблюдений (серая заливка), трёх моделей CMIP6 и их ансамблю

Название	Количество ЛН	Сред. И (°C)	Сред. П (мес.)
KIOST-ESM	19	-1,97	14
MIROC-ES2L	16	-2,18	21
INM-CM4-8	6	-1,04	7
ERSSTv5	11	-1,36	14
Ансамбль	11	-1,27	14

Рис. 1. Сравнение изменчивости аномалий ТПО в районе Nino3.4 в период 1950–2014 гг. по данным массива ERSSTv5 (красная линия) и ансамблю трёх моделей проекта CMIP6 (черная пунктирная линия). Зеленой полосой отмечена нейтральная зона, когда события ЭН и ЛН отсутствовали

Fig. 1. Comparison of the SST anomalies variability in the Nino3.4 region from 1950 to 2014 according to the ERSSTv5 data set (red line) and the ensemble of three CMIP6 models (black dashed line).

The green stripe is a neutral zone when El Niño and La Niña events were absent

Опираясь на полученные результаты сравнения моделей проекта CMIP6 с данными ERSSTv5, были созданы два ансам-

бля индекса Nino3.4 из трех моделей (MIROC-ES2L, INM-CM4-8 и KIOST-ESM) по сценариям SSP2.4-5 и SSP5.8-5 за период

с 2021 по 2085 гг. По полученным рядам индексов были выделены события ЭН и ЛН, прогнозируемые в ближайшие 65 лет (рис. 2). В то же время, были рассчитаны

их усредненные характеристики интенсивности и продолжительности в будущем (табл. 4). Таким образом, были получены следующие прогностические оценки.

Таблица 4. Количество событий ЭН и ЛН и их усредненные характеристики по ансамблю трех моделей проекта CMIP6 для двух сценариев SSP2.4-5 и SSP5.8-5 в период с 2021 по 2085 гг.

SSP2.4-5		ЭН	ЛН	SSP5.8-5		ЭН	ЛН
	Кол-во событий	14 шт.	15 шт.		Кол-во событий	12 шт.	20 шт.
	Сред. И	1,44°C	-1,4°C		Сред. И	1,27°C	-1,3°C
	Сред. П	14 мес.	14 мес.		Сред. П	15 мес.	12 мес.

По сценарию **SSP2-4.5** в ближайшие 65 лет количество событий ЭН уменьшится на 30%, при этом их средняя интенсивность и продолжительность не изменится (рис. 2, а). В случае ЛН, при оптимальном сценарии их количество возрастет на 26,6%, по сравнению с историческим периодом 1950–2014 гг., средняя интенсивность уменьшится незначительно (на 3%), а продолжительность событий останется неизменной.

При экстремальном сценарии CMIP6 (**SSP5.8-5**) до 2043 г. в экваториальной зоне Тихого океана не сформируется ни одно событие ЭН. Количество этих явлений и их интенсивность резко возрастет с середины XXI века (рис. 2, б). По сравне-

нию с историческим периодом (2014–2065 гг.) количество ЭН снизится на 40%, их средняя интенсивность уменьшится на 13%, а продолжительность явлений увеличится на 20%. В случае ЛН, их количество резко возрастет к первой половине XXI века, однако с 1950 г., интенсивность этих явлений, как и их повторяемость, уменьшится (рис. 2, б). Связано это с общим ростом температуры воды на 1,5°C в районе Nino3.4 к концу XXI века ($T_r=0,24^\circ\text{C}/10$ лет). В целом, по сравнению с периодом 1950–2014 гг. количество явлений ЛН в ближайшие 65 лет увеличится в два раза, однако их интенсивность и продолжительность незначительно уменьшится (примерно на 2-4%).

Рис. 2. Изменение аномалий ТПО по ансамблю трех моделей CMIP6 в районе Nino3.4 в период с 2021 по 2085 гг. по сценариям SSP2-4.5 (а) и SSP5-8.5 (б).

Красными линиями отмечены события ЭН, голубыми – события ЛН

Fig. 2. SST anomalies variability in the Nino3.4 by the ensemble of three CMIP6 models in 2021 to 2085 according to the SSP2-4.5 (a) and SSP5-8.5 (b) scenarios.

Red lines indicate El Niño events, blue lines indicate La Niña events

Закключение. На основе оптимального (SSP2-4.5) и крайне неблагоприятного (SSP5-8.5) сценариев проекта CMIP6 по

трём моделям (KIOST-ESM, MIROC-ES2L, INM-CM4-8) проведено сравнение модельных расчетов с данными реанализа

ERSSTv5. за период 1950–2014 гг. Получена оценка возможных изменений повторяемости событий ЭН и ЛН в будущем.

Исходя из полученных результатов ансамбля моделей проекта CMIP6, количество событий ЭН и ЛН в ближайшие 65 лет изменится следующим образом.

При оптимальном сценарии SSP2-4.5 повторяемость событий ЭН уменьшится на 30%. Однако, принимая во внимание то, что ансамбль моделей как раз на эту величину занижал их количество при сравнении с реальными данными, то следует считать, что повторяемость ЭН не изменится. При этом их средняя интенсивность и продолжительность также сохранятся. В то же время, количество ЛН возрастет на 26,6%, их средняя интенсивность уменьшится всего на 3%, а продолжительность событий останется неизменной.

По экстремальному сценарию развития SSP5-8.5 формирование ЭН снизится на 40%. В трактовке результата по сравнению с реально наблюдаемыми ЭН, их количество уменьшится на 10%, их средняя интенсивность снизится на 13%, а продолжительность увеличится на 20%. Количество ЛН в ближайшие 65 лет увеличится в два раза, однако их интенсивность и продолжительность незначительно уменьшится на ~2-4%.

Таким образом, в зависимости от социально-экономического пути развития, отвечающего за объемы выбросов углекислого газа в атмосферу, модельные оценки по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 проекта CMIP6 к концу XXI века демонстрируют увеличение числа событий ЛН – эпизодов похолодания в экваториальной зоне Тихого океана, что соответствует интенсификации отрицательной обратной связи в системе океан – атмосфера в условиях глобального потепления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M.* Multiscale Variabilities in Global Sea Surface Temperatures and Their Relationships with Tropospheric Climate Patterns // *Journal of Climate*. 1999. Vol. 12. P. 2719–2733. DOI:

10.1175/1520-0442(1999)012<2719: MVIGSS>2.0.CO;2

2. *Goddard L., Dilley M.* El Niño: Catastrophe or opportunity // *Journal of Climate*. 2005. Vol. 18. P. 651–665. DOI: 10.1175/JCLI-3277.1

3. *Philander S.G.* El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, CA. 1989. 293 p. DOI: 10.1126/science.248.4957.904

4. *Rasmusson E.M., Wallace J.M.* Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation // *Science*. 1983. Vol. 222. P. 1195–1202. DOI: 10.1126/science.222.4629.1195

5. *Larkin N.K., Harrison D.E.* On the definition of El Niño and associated seasonal average U.S. weather anomalies // *Geophysical Research Letters*. 2005. Vol. 32. L13705. DOI: 10.1029/2005GL022738

6. *Marchukova O.V., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S.* Diagnostics of the La Niña events in 1900–2018 // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020. Vol. 606. P. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012036

7. *Glantz M.H.* La Niña and its impacts: facts and speculations. Publ. The United Nations University, New York. 2002. 271 pp.

8. *Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V.* Application of neural networks for model prediction of El Niño and La Niña, including their types // *Meteorology and Hydrology*. 2020. № 11. P. 806–813. DOI: 10.3103/S1068373920110084

9. *Meinshausen M., Nicholls Z.R., Lewis J., Gidden J. et al.* The shared socioeconomic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500 // *Geosci. Model Dev.* 2020. Vol. 13. P. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020

10. *Wittenberg A., Rosati A., Lau N., Ploshay J.* GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part III: Tropical Pacific climate and ENSO // *J. Clim.* 2006. Vol. 19. P. 698–722. DOI: 10.1175/JCLI3631.1

11. *Riahi K., van Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J. et al.* The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview // *Global Environmental Change*. 2017. Vol. 42. P. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009

12. *O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V. et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for

CMIP6 // Geosci. Model Dev. 2016. Vol. 9. P. 3461–3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016

13. Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F., Boyer T. et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons // J. Climate. 2017. Vol. 30. P. 8179–8205. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1

14. <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/search/cmip6-ceda/> (дата обращения: 25.09.2021).

15. Patra P.K., Hajima T., Saito R., Chandra N. et al. Evaluation of earth system model and atmospheric inversion using total column CO₂ observations from GOSAT and OCO-2 // Progress in Earth and Planetary Science. 2021. Vol. 8. DOI: 10.1186/s40645-021-00420-z

16. Bandara J.S., Cai Y. The impact of climate change on food crop productivity, food prices and food security in South Asia // Economic Analysis and Policy. 2014. Vol. 44. P. 451–465. DOI: 10.1016/j.eap.2014.09.005

17. Hajima T., Yamamoto A., Kawamiya M., Su X. et al. Millennium time-scale experiments on climate-carbon cycle with doubled CO₂ concentration // Progress in Earth and Planetary Science. 2020. Vol. 7. DOI: 10.1186/s40645-020-00350-2

18. Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Spatial classification of La Nina events // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2017. Vol. 53. P. 111–119. DOI: 10.1134/S0001433817010133

ASSESSMENT OF POSSIBLE CHANGES IN THE EL NINO AND LA NINA REPEATABILITY BY THE END OF THE XXI CENTURY USING THE CMIP6 MODELS

E.N. Voskresenskaya¹, O.V. Marchukova¹, V.V. Afanasyeva²

¹Institute of Natural and Technical Systems,
RF, Sevastopol, Lenin St., 28

²Branch of Moscow State University M.V. Lomonosov in Sevastopol,
RF, Sevastopol, Heroes of Sevastopol St., 7

The quality of SST anomalies revealed in the equatorial Pacific associated with El Niño (EN) and La Niña (LN) in the CMIP6 project models (KIOST-ESM, MIROC-ES2L and INM-CM4-8) was evaluated by comparing with real events in the period 1950 to 2014 using the ERSSTv5 data sets. It is shown that the ensemble model estimation of the number, intensity and duration of EN and LN corresponds quite well to real conditions. On this basis, the corresponding model ensemble calculations of their future possible changes in 2021–2085 relative to the historical 1950–2014 period were carried out for two possible scenarios: business-as-usual (SSP2-4.5) and negative (SSP5-8.5).

Keywords: El Niño, La Niña, CMIP6, ocean surface temperature, long-term forecast.

REFERENCES

1. Enfield D.B. and Mestas-Nunez A.M. Multiscale Variabilities in Global Sea Surface Temperatures and Their Relationships with Tropospheric Climate Patterns. *Journal of Climate*, 1999, Vol. 12, pp. 2719–2733. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2719: MVIGSS>2.0.CO;2
2. Goddard L. and Dilley M. El Niño: Catastrophe or opportunity. *Journal of Climate*, 2005, Vol. 18, pp. 651–665. DOI: 10.1175/JCLI-3277.1
3. Philander S.G. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, San Diego, CA, 1989, 293 p. DOI: 10.1126/science.248.4957.904
4. Rasmusson E.M. and Wallace J.M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, Vol. 222, pp. 1195–1202. DOI: 10.1126/science.222.4629.1195
5. Larkin N.K. and Harrison D.E. On the definition of El Niño and associated seasonal average U.S. weather anomalies. *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol. 32, L13705. DOI: 10.1029/2005GL022738
6. Marchukova O.V., Voskresenskaya E.N., and Lubkov A.S. Diagnostics of the La Niña events in 1900–2018. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, Vol. 606, pp. 012036. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012036
7. Glantz M.H. La Niña and its impacts: facts and speculations. Publ. The United Nations University, New York, 2002, 271 p.

8. Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., and Marchukova O.V. Application of neural networks for model prediction of El Niño and La Niña, including their types. *Meteorology and Hydrology*, 2020, No 11, pp. 806–813. DOI: 10.3103/S1068373920110084
9. Meinshausen M., Nicholls Z.R., Lewis J., Gidden J. et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.*, 2020, Vol. 13, pp. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020
10. Wittenberg A., Rosati A., Lau N., and Ploshay J. GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models. Part III: Tropical Pacific climate and ENSO. *J. Clim.*, 2006, Vol. 19, pp. 698–722. DOI: 10.1175/JCLI3631.1
11. Riahi K., van Vuuren D.P., Kriegler E., Edmonds J. et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 2017, Vol. 42, pp. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009
12. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P., Eyring V. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 2016, Vol. 9, pp. 3461–3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016
13. Huang B., Thorne P.W., Banzon V.F., Boyer T. et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*, 2017, Vol. 30, pp. 8179–8205. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1
14. <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/search/cmip6-ceda/> (date of appeal: 25.09.2021).
15. Patra P.K., Hajima T., Saito R., Chandra N., et al. Evaluation of earth system model and atmospheric inversion using total column CO₂ observations from GOSAT and OCO-2. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2021, Vol. 8. DOI: 10.1186/s40645-021-00420-z
16. Bandara J.S. and Cai Y. The impact of climate change on food crop productivity, food prices and food security in South Asia. *Economic Analysis and Policy*, 2014, Vol. 44, pp. 451–465. DOI: 10.1016/j.eap.2014.09.005
17. Hajima T., Yamamoto A., Kawamiya M., Su X. et al. Millennium time-scale experiments on climate-carbon cycle with doubled CO₂ concentration. *Progress in Earth and Planetary Science*, 2020, Vol. 7. DOI: 10.1186/s40645-020-00350-2
18. Voskresenskaya E.N. and Marchukova O.V. Spatial classification of La Nina events. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2017, Vol. 53, pp. 111–119. DOI: 10.1134/S0001433817010133