

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-2-105-120>

УДК 551.515.4

Тенденции изменения среднегодовых осадков в Азово-Черноморском регионе по данным моделей проекта CMIP6

А.Б. Полонский, П.А. Сухонос

*Институт природно-технических систем, г. Севастополь, Россия
apolonsky5@mail.ru*

С использованием результатов численных расчётов по глобальным климатическим моделям CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G-p3, входящим в проект CMIP6, получены проекции изменения количества среднегодовых величин месячных сумм осадков для Азово-Черноморского региона в 21 веке и наиболее вероятного климатического сценария SSP2-4.5. Модели, выбранные из ансамбля 36 глобальных численных моделей, адекватно воспроизводят режим осадков над Азово-Черноморским регионом. Рассчитаны тенденции изменения среднегодовых величин месячных сумм осадков в период 2030–2099 гг. и изменение медианы осадков в краткосрочной (2030–2049 гг.), среднесрочной (2060–2079 гг.) и долгосрочной (2080–2099 гг.) перспективе по отношению к базовому периоду (1995–2014 гг.). Получено, что в среднем над Черным морем к концу 21 века вероятно уменьшение среднегодовых величин месячных сумм осадков от 1,8 мм (согласно модели CNRM-CM6-1-HR-f2) до 2,8 мм (согласно модели GISS-E2-1-G-p3). При этом в отдельных районах Азово-Черноморского региона (в частности, в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий) вероятное уменьшение количества среднегодовых величин месячных сумм осадков составит к концу 21 века почти 7 мм, годовых – более 80 мм.

Ключевые слова: среднегодовые осадки, климатические проекции, долговременные тренды количества осадков, Черное море

Trends in annual precipitation in the Azov-Black Sea region from CMIP6 models

A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos

*Institute of Natural and Technical Systems, Sevastopol, Russia
apolonsky5@mail.ru*

Using the results of numerical simulations with the CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4, and GISS-E2-1-G-p3 CMIP6 global climate models, projections of annual precipitation changes in the Azov-Black Sea region in the 21st century under the SSP2-4.5 climate scenario were obtained. The models were selected from the ensemble of 36 global numerical models as they adequately represent the regional precipitation regime. Trends in annual mean values of monthly total precipitation for the period of 2030–2099 and the change in the median of precipitation in the short (2030–2049), medium (2060–2079), and long term (2080–2099) with respect to the base climate period (1995–2014) were calculated. It was found that on average over the Black Sea by the end of the 21st century, a decrease in the annual values of monthly precipitation from 1,8 mm (based on the CNRM-CM6-1-HR-f2

model data) to 2,8 mm (based on the GISS-E2-1-G-p3 model data) is expected. At the same time, in certain areas of the Azov-Black Sea region (in particular, in the vicinity of the Anatolian and Caucasian coasts), a probable decrease in the annual values of monthly (annual) precipitation by the end of the 21st century will be almost 7 mm (>80 mm).

Keywords: annual precipitation, climate projections, long-term trends in precipitation, Black Sea

Введение

Водный баланс Черного и Азовского морей в условиях современных и вероятных будущих климатических изменений на протяжении 21 века изучался в достаточно большом количестве работ (см., например, [2–7, 26]). Известно, что в современных климатических условиях основной вклад в приток пресных вод в Черное и Азовское моря вносит речной сток. Для Черного моря превышение этого вклада над вкладом осадков по оценкам различных авторов составляет от 1,2 до 2,9 раз. Если принять суммарный поверхностный приток пресных вод в этот водоём за 1, то соотношение речного стока и осадков в этот приток для современных климатических условий оценивается в среднем как 0,65:0,35 [6]. Для Азовского моря соответствующее соотношение указывает на ещё большее преобладание речного стока над осадками в общем балансе пресных вод, что является следствием относительно небольшой площади акватории моря [8].

Что касается долговременных тенденций, то многочисленные оценки, выполненные различными авторами, показывают, что статистически значимые тренды столетнего масштаба в стоках крупнейших Азово-Черноморских рек отсутствуют [26, 27]. Вместе с тем в ряде работ показано, что количество осадков над Азово-Черноморским регионом имеет тенденцию к уменьшению, которое до конца 21 века может достигнуть 20–30 % по сравнению с концом 20 века. На первый взгляд полученные тенденции речного стока и осадков противоречат друг другу. На самом деле это не соответствует действительности, поскольку крупнейшие реки Азово-Черноморского бассейна характеризуются смешанным типом питания. Например, Дунай (вторая по величине расхода река Европы) берёт своё начало в Альпах, ледники которых тают в процессе потепления, что вызывает увеличение части стока Дуная ледникового происхождения. Если при этом количество осадков над площадью водосбора Дуная и соответствующая часть его стока уменьшаются, суммарный сток может оставаться неизменным. Кроме этого, всё большая часть речных вод Азово-Черноморского региона расходуется на промышленные и хозяйственные нужды, что нарушает естественный региональный круговорот воды и связанный с ним пресный баланс Черного и Азовского морей [8, 27].

Таким образом, осадки, как следует из приведенных выше данных, являются важнейшим фактором, определяющим долговременные тенденции изменения пресного баланса Черного моря. В настоящей работе рассчитаны и проанализированы наиболее вероятные тенденции изменения

среднегодовых осадков в Азово-Черноморском регионе до конца 21 века. Для этих расчётов использованы результаты численного моделирования будущих климатических изменений (т. е. климатические проекции), которые являются основным инструментом для количественной оценки возможных изменений климата в 21 веке. В последнее время достигнут существенный прогресс в многомодельном подходе к численному моделированию будущих изменения климата. Для понимания закономерностей климатических изменений, рассчитанных с использованием различных численных моделей по определенным сценарным траекториям, реализуется международный исследовательский проект сравнения таких моделей (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) [19]. К настоящему времени выполнены расчеты по результатам 6-й фазы этого проекта. Участвующие в нем численные модели характеризуются повышенным пространственным разрешением, улучшенными схемами параметризации физических процессов подсеточных масштабов и добавлением дополнительных эффектов, влияющих на климатические характеристики и не учитываемых ранее [20].

Проекция изменения среднегодовых осадков по данным моделей проекта CMIP6 проанализированы для многих регионов земного шара. В частности, анализ проекций изменения осадков, полученных по данным 15 моделей проекта CMIP6 в рамках сценария SSP2-4.5, показал значимое увеличение среднегодовых осадков для территории Центральной Азии. К концу 21 века эти осадки увеличатся более чем на 10 % [24]. Согласно данным 27 моделей проекта CMIP6, среднегодовое количество осадков в Южной Азии увеличится в 21 веке по всем сценариям изменения климата [16]. При этом в разных регионах Южной Азии скорость увеличения среднегодового количества осадков значительно различается. Так, к концу 21 века в соответствии со сценарием SSP5-8.5 диапазон увеличения среднегодового количества осадков (с учетом статистической неопределенности) в регионе составит от 17,1 (2,2–49,1) % до 27,3 (5,3–160,5) %. Проекция изменения среднегодовых осадков над Китаем, полученные по данным 20 моделей проекта CMIP6, показывают увеличение количества осадков к концу 21 века по климатическим сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 [29]. При этом наибольший рост среднегодового количества осадков ожидается на севере и западе Китая, особенно в рамках сценария SSP5-8.5. Как показано в более поздней работе [18], модели проекта CMIP6 обеспечивают надежное воспроизведение средних и экстремальных величин осадков для контрольного периода на большей части Евразии, за исключением тех регионов, в которых наблюдалось уменьшение количества осадков – в них большинство моделей проекта CMIP6 показывают их увеличение. Тенденции изменения осадков над Африканским континентом, полученных по данным 27 моделей проекта CMIP6, в краткосрочной (2030–2059 гг.) и долгосрочной (2070–2099 гг.) перспективе по отношению к базовому периоду (1981–2010 гг.) продемонстрировали вероятное увеличение среднего

по площади количества осадков в Африке на 6,8 (8,5) % в краткосрочной (долгосрочной) перспективе в соответствии со сценарием изменения климата SSP2-4.5 [15]. Тенденции изменения осадков, рассчитанные по данным 31 модели проекта CMIP6 для региона Северной и Центральной Америки, характеризуются большой неопределенностью, но в целом указывают на увеличение среднегодового количества осадков к концу 21 века (на 10–30 %) на большей части Северной Америки и их уменьшение (на 10–40 %) в Центральной Америке и Карибском бассейне [14]. Таким образом, большой разброс проекций изменения осадков подчеркивает их высокую пространственную неоднородность и необходимость проведения регионального анализа.

Для Азово-Черноморского региона, который, как известно, также характеризуется высокой пространственной неоднородностью [12], в ряде работ получены проекции изменения количества осадков в 21 веке. Результаты климатических расчетов, проведенных в соответствии с одним из самых неблагоприятных сценариев (A2) в рамках проекта CMIP3, продемонстрировали увеличение зимних осадков над Черным морем в 2071–2100 гг. на 15–20 % по отношению к контрольному периоду (1961–1990 гг.) [2]. Анализ региональных проекций изменения осадков показал, что для пессимистичного сценария RCP8.5, рассмотренного в рамках проекта CMIP5, к концу 21 века летние осадки уменьшатся почти до 50 %, а изменение зимних осадков будет менее выражено [4]. Как следствие, тенденции изменения среднегодовых осадков будут отрицательны и незначимы. В работе [5] приведены результаты расчетов, полученные с помощью двух региональных атмосферных моделей. Они подтвердили результаты статьи [4], которые указывают на значимое понижение количества осадков в весенне-летний период при незначимом изменении количества зимних осадков над Черным морем в 21 веке. Эти результаты получены в рамках пессимистичного сценария RCP8.5. Осадки сравнивались с осадками за контрольный период (1971–2000 гг.). Таким образом, проекции изменения количества осадков в 21 веке в Азово-Черноморском регионе неоднозначны и требуют актуализации на основе численных расчетов, выполненных в шестой фазе проекта CMIP.

Конечно, оценка будущих изменений количества региональных осадков в решающей степени зависит от выбора моделей и климатических сценариев, которые используются при ее получении [1, 17]. Анализ способности 36 моделей проекта CMIP6 адекватно воспроизводить месячные и среднегодовые величины региональных осадков, а также тенденции их изменения за исторический период, выполненный авторами в работах [10, 11], позволил отобрать лучшие численные модели для построения оптимизированных для территории Азово-Черноморского региона проекций изменения осадков. В настоящей работе с помощью отобранных климатических моделей проанализированы тенденции изменения среднегодовых величин месячных региональных осадков на середину и конец 21 века при наиболее вероятном сценарии социо-экономического развития и ограничения

эмиссии парниковых газов до конца столетия, которым является сценарий SSP2-4.5. Выбор указанного сценария основан на анализе текущего состояния правового регулирования эмиссии парниковых газов в странах, отвечающих за основную долю суммарных выбросов парниковых газов, проведенном в работе [9].

Данные и методы

В работе использованы месячные суммы осадков (выраженные в мм), полученные по результатам расчетов с использованием численных моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 (пространственное разрешение $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, 1 реализация) [28], GFDL-CM4 (пространственное разрешение $1^\circ \times 1,25^\circ$, 1 реализация) [22] и GISS-E2-1-G-p3 (пространственное разрешение $2^\circ \times 2,5^\circ$, 5 реализаций) [21], входящих в международную программу CMIP6. Выбор этих климатических моделей обусловлен тем, что они неплохо воспроизводят внутригодовой цикл и среднегодовые величины осадков над Черным морем, а также качественные тенденции их изменения в исторический период (см. ниже, а также [10, 11]). Расчеты производились для периода с 1959 по 2099 год. Данные доступны на сайте (<https://climexp.knmi.nl/>). Для сравнения с модельными результатами привлекались данные реанализа ERA5 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ за период 1959–2022 гг. [23]. Исследуемый регион ограничен координатами ($40\text{--}48^\circ$ с. ш. $26\text{--}42^\circ$ в. д.). Он выбирался таким образом, чтобы охватить не только всю Азово-Черноморскую акваторию, но и прилегающие районы суши, на которых формируется значительная часть регионального речного стока.

По данным об осадках, полученных по модели GISS-E2-1-G-p3, рассчитаны средние месячные суммы осадков по всем ее реализациям. По данным всех численных моделей о месячных величинах осадков получены их среднегодовые значения. Затем с помощью метода квантильной регрессии [13] оценены их долгопериодные тенденции за период 2030–2099 гг. для квантиля 0,5 (медиана). Определение стандартных ошибок при расчете коэффициентов медианного тренда выполнено методом бутстреп [25]. После этого рассмотрены базовый (1995–2014 гг.) и три будущих временных интервала (2030–2049, 2060–2079 и 2080–2099 гг.). Изменение количества осадков в Азово-Черноморском регионе в 21 веке рассчитывается как разность между медианными значениями климатической переменной в будущие периоды и ее значениями в базовом периоде. Статистическая значимость полученных разностных величин, представляющих собой изменения медианы количества осадков в 20-летние будущие периоды по отношению к базовому периоду, оценивалась с использованием стандартного *t*-теста Стьюдента.

Результаты

Перед тем, как перейти к анализу долгопериодных тенденций изменения среднегодовых осадков рассмотрим временные ряды среднегодовых

величин месячных осадков и сезонный цикл осадков, усредненных по акватории Черного моря, за период 1959–2022 гг. по данным выбранных численных моделей и реанализа ERA5 (рис. 1).

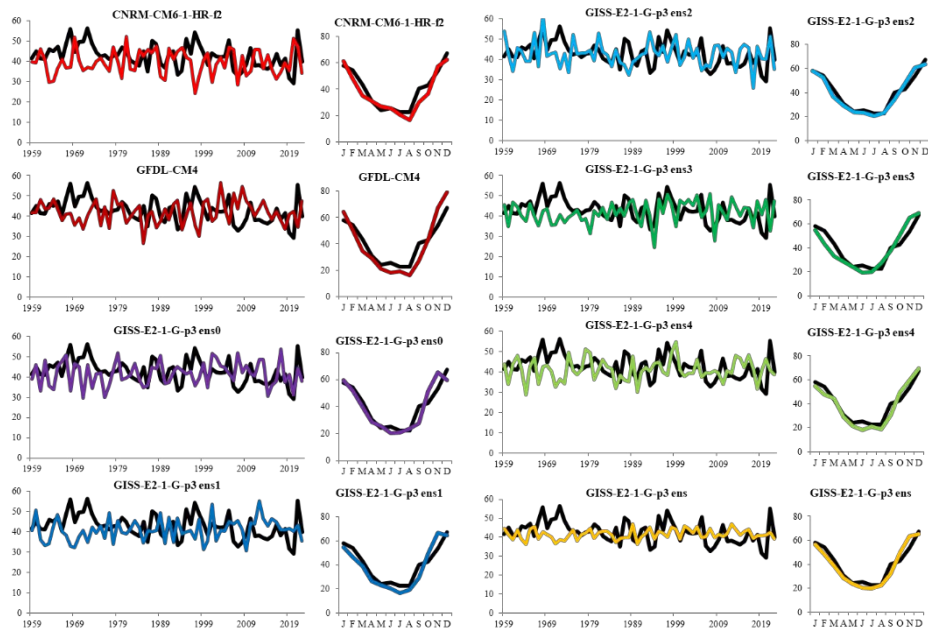


Рис. 1. Временные ряды среднегодовых величин месячных осадков (мм) (1 и 3-й столбцы) и сезонного хода осадков (мм) (2 и 4-й столбцы), усредненных по акватории Черного моря за период 1959–2022 гг. по данным реанализа ERA5 (показано черным цветом) и моделей проекта CMIP6 (цветные кривые).
Fig. 1. Annual precipitation time series (mm) (1st and 3rd columns) and monthly climatology (mm) (2nd and 4th columns) spatially averaged over the Black Sea for the period 1959–2022 based on ERA5 data (black) and CMIP6 models (colored).

Доверительный интервал медианы среднегодовых величин месячных осадков на 99%-ном уровне по данным реанализа ERA5 составляет 39,9–45,1 мм. Медиана среднегодовых осадков за исторический период по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 равна 39,9 и 42,0 мм соответственно. Для различных реализаций модели GISS-E2-1-G-p3 указанная величина изменяется в диапазоне от 40,7 (реализации ens1 и ens 4) до 42,8 мм (ens 2). При этом медиана среднегодовых величин месячных осадков для среднего по ансамблю реализаций модели GISS-E2-1-G-p3 равна 41,5 мм.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) среднегодовых величин месячных осадков по данным реанализа ERA5 составляет 5,96 мм. СКО среднегодовых осадков за рассматриваемый период по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 равно 6,13 и 5,80 мм соответственно.

Для реализаций модели GISS-E2-1-G-r3 указанная величина изменяется в диапазоне от 5,33 (ens1) до 6,26 мм (ens2). СКО среднегодовых осадков для среднего по ансамблю реализаций модели GISS-E2-1-G-r3 равно 2,64 мм.

Сезонный цикл осадков над Черным морем достаточно хорошо описывается всеми используемыми моделями. Выявлены лишь незначительные несоответствия между модельными данными и результатами реанализа. Согласно реализациям ens0 и ens1 модели GISS-E2-1-G-r3, максимум осадков в сезонном цикле отмечается в ноябре (а по данным ERA5 в декабре). Модель GFDL-CM4 несколько завышает величины осадков с ноября по январь. При этом величины месячных осадков по данным всех численных моделей находятся в пределах доверительного интервала медианы месячных осадков (на уровне значимости 99 %), полученного по данным реанализа ERA5.

Таким образом, величины медианы и амплитуды межгодовых колебаний среднегодовых осадков, а также сезонный цикл осадков в исторический период, полученные по данным рассматриваемых численных моделей, достаточно хорошо согласуются с данными реанализа. Это дает основания детально рассматривать изменение медианы среднегодовых осадков и ее долгопериодные тенденции в Азово-Черноморском регионе, ожидаемые в будущем при наиболее вероятном сценарии изменения концентрации парниковых газов в тропосфере, по данным перечисленных моделей проекта CMIP6.

Естественно, пространственное распределение величины трендов осадков в рассматриваемом регионе существенно зависит от разрешения численных моделей (рис. 2). Единственная модель, которая в большей или меньшей степени разрешает все основные особенности рельефа подстилающей поверхности Азово-Черноморского региона, включая Крымские горы, – это модель CNRM-CM6-1-HR-f2 (с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$). Оценка трендов, полученная с использованием этой модели, показывает, что наибольшие отрицательные коэффициенты медианного тренда среднегодовых величин месячных осадков за период 2030–2099 гг. отмечаются в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий, а также Крымских гор. В указанных регионах величины этих коэффициентов составляют менее $-0,1$ мм/год.

По данным моделей с более грубым разрешением, никаких значимых особенностей в трендах среднегодовых величин месячных осадков в районе Крымских гор (а по данным модели GFDL-CM4 и в окрестности Кавказских гор) не выявлено. Модель с самым грубым разрешением (GISS-E2-1-G-r3) показывает наличие только отрицательных трендов среднегодовых величин месячных осадков за период 2030–2099 гг. во всем Азово-Черноморском регионе со значимыми на 99%-ном доверительном уровне величинами в его южной и восточной частях. В указанных областях величины этих коэффициентов составляют около $-0,2$ мм/год. По данным модели GFDL-CM4, наряду с областями со значимыми отрицательными

трендами осадков, отмечаются также области с положительными коэффициентами медианного тренда среднегодовых величин месячных осадков (величины которых составляют более 0,06 мм/год), которые расположены к северу от Кавказских гор и в южной части Черного моря в полосе долгот 30–33° в. д. По данным двух других рассматриваемых климатических моделей эти области не выделяются.

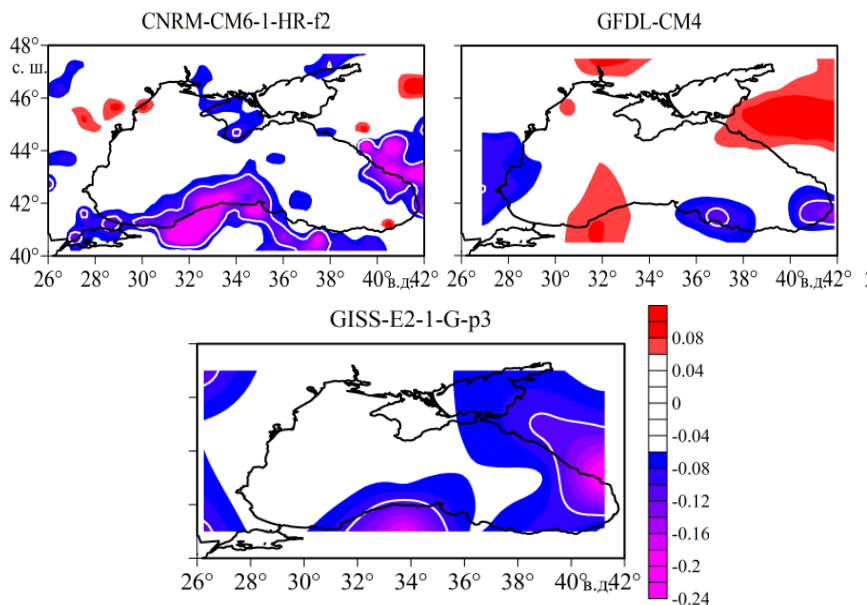


Рис. 2. Пространственное распределение коэффициентов медианного тренда среднегодовых величин месячных осадков (мм/год) в Азово-Черноморском регионе по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G-p3 в период 2030–2099 гг. Цветом показаны значимые на уровне доверия 99 % величины коэффициентов медианного тренда. Белая изолиния показывает -0,1 мм/год.

Fig. 2. Spatial distribution of median trend coefficients of annual averaged monthly precipitation (mm/year) over the Azov-Black Sea region from the CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 and GISS-E2-1-G-p3 models for the period 2030–2099. The colors show the values of median trend coefficients that are significant at the 99 % confidence level. The white isoline shows -0.1 mm/year.

Перейдем к анализу пространственно-временной структуры изменений медианы среднегодовых осадков в будущем по отношению к базовому периоду (1995–2014 гг.) в Азово-Черноморском регионе (рис. 3) и над акваторией Черного моря (рис. 4).

В краткосрочной перспективе (2030–2049 гг.) медиана среднегодовых величин месячных осадков по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 увеличивается (относительно базового периода) в северо-западной части Азово-Черноморского региона и на востоке Черного моря. Это увеличение составляет около 4 мм.

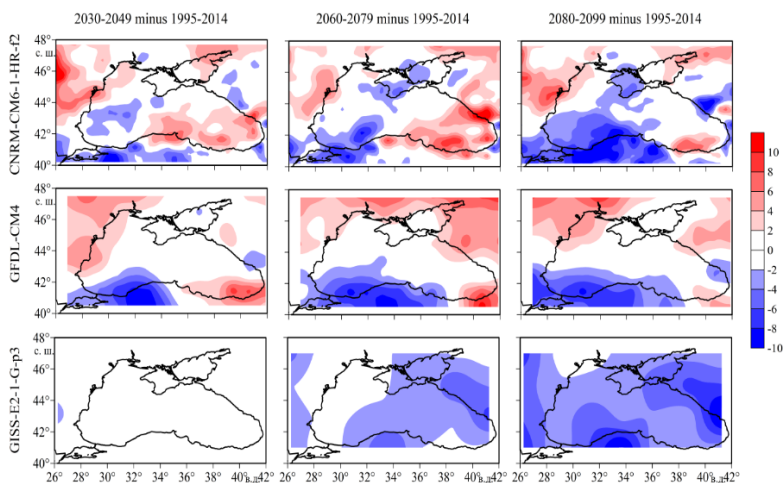


Рис. 3. Пространственное распределение будущих изменений среднегодовых величин месячных осадков (мм) в Азово-Черноморском регионе для сценария SSP2-4.5 для трех временных интервалов (2030–2049 гг., 2060–2079 гг. и 2080–2099 гг.) по сравнению с базовым периодом (1995–2014 гг.).

Fig. 3. Spatial distribution of future changes of annual averaged monthly precipitation (mm) over the Azov-Black Sea region for the SSP2-4.5 scenario for three time intervals (2030–2049, 2060–2079 and 2080–2099) compared to the present (1995–2014) climate.

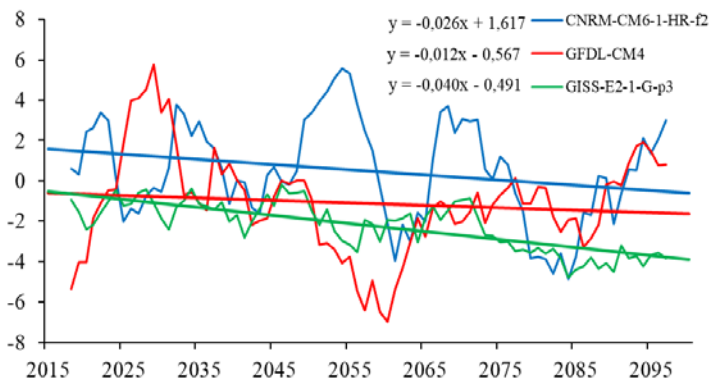


Рис. 4. Изменения среднегодовых величин месячных осадков (мм) для всего Черного моря с 2015 г. и до конца 21 века. Кривые получены путем взятия разницы значения каждого будущего года относительно среднего значения за базовый период (1995–2014 гг.) с последующим 7-летним скользящим осреднением. Прямые цветные линии – медианные тренды (для значения квантиля 0,5). На рисунке также показаны уравнения медианного тренда.

Fig. 4. Evolution of future annual values of monthly precipitation (mm) over the entire Black Sea during the 21st century. The curves are obtained by subtracting each future year's value from the mean value for the present (1995–2014) climate period and then taking the 7-year moving average thereafter. The straight colored lines are the median trends (for the 0.5 quantile value). The median trend equations are also shown in the figure.

На юго-западе рассматриваемого региона по данным указанных моделей получено уменьшение медианы среднегодовых величин месячных осадков почти на 8 мм. По данным модели GISS-E2-1-G-r3 значимого изменения медианы анализируемых осадков в краткосрочной перспективе в Азово-Черноморском регионе не обнаружено.

В среднесрочной перспективе (2060–2079 гг.) медиана среднегодовых величин месячных осадков по данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 увеличивается в восточной части Черного моря по отношению к базовому периоду почти на 4 мм, но уменьшается на юго-западе рассматриваемого региона и в окрестности Крымского полуострова. В этот период по данным модели GFDL-CM4 северная часть и небольшая область на юго-востоке Азово-Черноморского региона характеризуется увеличением медианы среднегодовых величин месячных осадков, а юг и юго-запад рассматриваемого региона – уменьшением. По данным модели GISS-E2-1-G-r3 уменьшение медианы анализируемых осадков отмечается в центральной и восточной частях Азово-Черноморского региона с максимумами в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий (свыше 4 мм).

В долгосрочной перспективе (2080–2099 гг.) медиана среднегодовых величин месячных осадков по данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 увеличивается относительно базового периода в небольших по площади областях в северо-восточной и северо-западной частях Азово-Черноморского региона и на юго-востоке Черного моря. Уменьшение медианы анализируемых осадков отмечается на Анатолийском и Кавказском побережье, в окрестности Крымского полуострова и центральной и западной частях Черного моря. В этот период по данным модели GFDL-CM4 северо-западная и северо-восточная части Азово-Черноморского региона характеризуются увеличением среднегодовых осадков, а юг и юго-запад рассматриваемого региона – их уменьшением. По данным модели GISS-E2-1-G-r3 значимое уменьшение осадков охватывает почти весь Азово-Черноморский регион с максимумами в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий (свыше 6 мм).

Модели CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 с относительно высоким ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) и средним ($1^\circ \times 1,25^\circ$) пространственным разрешением, соответственно, указывают на наличие интенсивной междесятилетней изменчивости среднегодовых осадков над Черным морем. По данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 максимум междесятилетнего цикла приходится на 2054 год (+5,6 мм относительно базового периода), а минимум – на 2084 год (-4,8 мм относительно базового периода). По данным модели GFDL-CM4 соответствующий максимум приходится на 2029 год (+5,8 мм относительно базового периода), а минимум – на 2060 год (-6,9 мм относительно базового периода). В модели GISS-E2-1-G-r3 с более грубым пространственным разрешением ($2^\circ \times 2,5^\circ$) междесятилетняя изменчивость характеризуется значительно меньшей амплитудой. Отметим, что для фильтрации интенсивной межгодовой изменчивости временные ряды разницы количества

среднегодовых осадков за каждый будущий год относительно среднего значения за базовый период были предварительно сглажены 7-летним скользящим средним.

Наряду с междесятилетней изменчивостью, временная эволюция среднегодовых осадков для Черного моря в течение 21 века характеризуется отрицательным медианным трендом по всем анализируемым численным моделям. По данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2 медианный тренд значим на 95%-ном доверительном уровне. Величина соответствующего коэффициента для среднегодовых величин месячных осадков равна $-0,026$ мм/год. Это означает, что вероятное уменьшение количества региональных месячных осадков в среднем за год к концу 21 века составит около 1,8 мм относительно базового периода (или около 22 мм для годовых сумм осадков). По данным модели GFDL-CM4 медианный тренд также отрицателен, хотя и статистически незначим на 95 %-ном доверительном уровне. Соответствующий коэффициент по абсолютной величине примерно вдвое меньше приведенного выше коэффициента, рассчитанного по данным модели CNRM-CM6-1-HR-f2. Медианный тренд, оцененный по данным модели GISS-E2-1-G-r3, значим на 99%-ном доверительном уровне. Величина его коэффициента для среднегодовых величин месячных осадков равна $-0,040$ мм/год. Это означает, что вероятное уменьшение количества месячных осадков в среднем за год над Черным морем к концу 21 века (относительно базового периода) составит по данным модели GISS-E2-1-G-r3 около 2,8 мм (или около 34 мм для годовых сумм осадков).

Выводы

Проанализированы численные оценки изменения количества среднегодовых осадков для Азово-Черноморского региона в 21 веке с использованием моделей CNRM-CM6-1-HR-f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G-r3, участвующих в международной программе CMIP6. Эти модели адекватно воспроизводят медиану и амплитуду межгодовых колебаний среднегодовых осадков над Черным морем и их сезонный цикл в исторический период (1959–2022 гг.), полученные по данным реанализа ERA5. Основные результаты анализа сводятся к следующему.

Модельные расчеты указывают на наличие междесятилетних изменений количества осадков в Азово-Черноморском регионе в течение 21 века значительной амплитуды. Наличие выраженной низкочастотной изменчивости может сильно влиять на величину будущих изменений осадков при выборе разных временных интервалов для расчета трендов. Причем фазы этих квазипериодических мод не совпадают по результатам численных расчетов с использованием разных климатических моделей. Вместе с тем долговременные тенденции ожидаемых к концу 21 века изменений среднегодовых величин месячных осадков над Черным морем начиная с 2015 года согласованы по трем отобраным численным моделям и характеризуются отрицательным медианным трендом. В целом, к концу 21 века вероятно

уменьшение среднегодовых величин месячных (годовых) сумм осадков над Черным морем от 1,8 мм (около 22 мм) согласно модели CNRM-CM6-1-HR-f2 до 2,8 мм (около 34 мм) согласно модели GISS-E2-1-G-r3.

Рассматриваемые численные модели показывают значимое на 99%-ном доверительном уровне уменьшение количества среднегодовых величин месячных осадков в окрестности Анатолийского и Кавказского побережий в период 2030–2099 гг. Вероятное уменьшение среднегодовых величин месячных (годовых) сумм осадков к концу 21 века в этих регионах составит почти 7 мм (более 80 мм).

В краткосрочной перспективе (2030–2049 гг.) по данным моделей CNRM-CM6-1-HR-f2 и GFDL-CM4 отмечается значимое увеличение медианы среднегодовых величин месячных осадков в северо-западной части Азово-Черноморского региона и на востоке Черного моря (почти на 4 мм). В то же время ожидается значимое уменьшение медианы осадков на юго-западе рассматриваемого региона (почти на 8 мм) по отношению к базовому периоду. В долгосрочной перспективе (2080–2099 гг.) по данным всех моделей ожидается значимое уменьшение медианы среднегодовых осадков на юге и юго-западе рассматриваемого региона.

Авторы статьи выражают глубокую признательность анонимному рецензенту за полезные рекомендации, позволившие улучшить первый вариант статьи, и редакции за оперативное и профессиональное рассмотрение рукописи.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (№ госрегистрации 124020100120-9).

The study was supported by state assignment of Institute of natural and technical systems (Project Reg. No. 124020100120-9).

Список литературы

1. *Алешина М.А., Семенов В.А.* Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8, № 4. С. 424–440. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-4-424-440
2. *Анисимов А.Е., Ефимов В.В.* Численные оценки изменения осадков в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 6. С. 45–58.
3. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 430 с.
4. *Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е.* Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2 (182). С. 3–14.
5. *Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е., Барабанов В.С.* Региональные проекции изменений климата в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 5 (185). С. 53–72.
6. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
7. *Леонов А.К.* Региональная океанография. Часть 1. Берингово, Охотское, Японское, Каспийское и Черное моря. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 765 с.

8. Матишов Г.Г., Абраменко М.И., Гаргона Ю.М., Буфетова М.В. Новейшие экологические феномены в Азовском море (вторая половина XX века). Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 2003. 441 с.

9. Пекарникова М.Е., Полонский А.Б. Анализ реалистичности достижения основной цели Парижского соглашения при существующей системе правового регулирования и контроля за антропогенными выбросами парниковых газов // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 2. С. 190-208. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-2-190-208

10. Полонский А.Б., Сухонос П.А. О воспроизводимости тенденций изменения осадков над Черным морем моделями CMIP6 // *Системы контроля окружающей среды*. 2024. № 4 (58). С. 16-27. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-4-16-27

11. Полонский А.Б., Сухонос П.А. О воспроизведении сезонного хода и среднегодовых осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6 // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2025. № 1 (395). С. 51-69. DOI: 10.37162/2618-9631-2025-1-51-69

12. *Справочник по климату Черного моря*. М.: Гидрометеиздат, 1974. 406 с.

13. Тимофеев А.А., Стерин А.М. Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // *Метеорология и гидрология*. 2010. № 5. С. 27-41.

14. Almazroui M., Islam M.N., Saeed F., Saeed S., Ismail M., Azhar Ehsan M., Diallo I., O'Brien E., Ashfaq M., Martínez-Castro D., Cavazos T., Cerezo-Mota R., Tippet M.K., Gutowski Jr. W.J., Alfaro E.J., Hidalgo H.G., Vichot-Llano A., Campbell J.D., Kamil S., Rashid I.U., Bamba Sylla M., Stephenson T., Taylor M., Barlow M. Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs // *Earth Syst. Environ.* 2021. Vol. 5. P. 1-24. DOI: 10.1007/s41748-021-00199-5

15. Almazroui M., Saeed F., Saeed S., Islam M.N., Ismail M., Klutse N.A.B., Siddiqui M.H. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6 // *Earth Syst. Environ.* 2020. Vol. 4. P. 455-475. DOI: 10.1007/s41748-020-00161-x

16. Almazroui M., Saeed S., Saeed F., Islam M.N., Ismail M. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6 // *Earth Syst. Environ.* 2020. Vol. 4. P. 297-320. DOI: 10.1007/s41748-020-00157-7

17. Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs // *J. Water Clim. Change*. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 103-113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081

18. Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblás-Reyes F.J. How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? // *Geophys. Res. Lett.* 2023. Vol. 50. P. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466

19. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geosci. Model Dev.* 2016. Vol. 9, no. 5. P. 1937-1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016

20. Eyring V., Cox P.M., Flato G.M., Gleckler P.J., Abramowitz G., Caldwell P., Collins W.D., Gier B.K., Hall A.D., Hoffman F.M., Hurtt G.C., Jahn A., Jones C.D., Klein S.A., Krasting J.P., Kwiatkowski L., Lorenz R., Maloney E., Meehl G.A., Pendergrass A.G., Pincus R., Ruane A.C., Russell J.L., Sanderson B.M., Santer B.D., Sherwood S.C., Simpson I.R., Stouffer R.J., Williamson M.S. Taking climate model evaluation to the next level // *Nat. Clim. Change*. 2019. Vol. 9, no. 2. P. 102-110. DOI: 10.1038/s41558-018-0355-y

21. GISS. NASA-GISS GISS-E2-1-G-CC model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.11657

22. Guo H., John J.G., Blanton C., McHugh C., Nikonov S., Radhakrishnan A., Rand K., Zadeh N.T., Balaji V., Durachta J., Dupuis C., Menzel R., Robinson T., Underwood S., Vahlenkamp H., Dunne K.A., Gauthier P.P.G., Ginoux P., Griffies S.M., Hallberg R., Harrison M., Hurlin W., Lin P., Malyshev S., Naik V., Paulot F., Paynter D.J., Ploshay J., Schwarzkopf D.M., Seman C.J., Shao A., Silvers L., Wyman B., Yan X., Zeng Y., Adcroft A., Dunne J.P., Held I.M., Krasting J.P., Horowitz L.W., Milly C., Shevliakova E., Winton M., Zhao M., Zhang R. NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Version 20190318. Earth System Grid Federation. 2018. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.9263

23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.* 2020. Vol. 146, no 730. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803

24. Jiang J., Zhou T., Chen X., Zhang L. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15, no. 5. P. 054009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7d03

25. Koenker R. Quantile Regression. Econometric Society Monographs. Cambridge, 2005. 349 p.

26. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // *J. Mar. Syst.* 2006. Vol. 60, no. 3-4. P. 235-254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011

27. Polonsky A., Belokopytov V., Dzhiganshin G. Low-frequency variability of hydrological fields in the North West Black Sea // *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes (Varna, Bulgaria, 14-18 November 1995): proc. – Varna, 1995.*

28. Voldoire A. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1-HR model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation. 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.1385

29. Yang X.L., Zhou B.T., Xu Y., Han Z.-Y. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China // *Adv. Atmos. Sci.* 2021. Vol. 38, no. 5. P. 817-830. DOI: 10.1007/s00376-021-0351-4

References

1. Aleshina M.A., Semenov V.A. Izmeneniya kharakteristik osadkov na territorii Rossii v XX–XXI vv. po dannym ansamblya modeley CMIP6 [Changes in precipitation characteristics over Russia in XX-XXI centuries from CMIP6 models ensemble]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2022, vol. 8, no. 4, pp. 424-440 [in Russ.]. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-4-424-440.

2. Anisimov A.Ye., Yefimov V.V. Chislennyye otsenki izmeneniya osadkov v Chernomorskom regione v XXI stoletii [Numerical estimates of precipitation changes in the Black Sea region in the 21st century]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2012, no. 6, pp. 45-58 [in Russ.].

3. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR*. T. IV. Chernoye more. Vyp.1. Hidrometeorologicheskiye usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. IV. Black Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 1991, 430 p. [in Russ.].

4. Yefimov V.V., Volodin Ye.M., Anisimov A.Ye. Modelirovaniye izmeneniy klimata v Chernomorskom regione v XXI stoletii [Modeling climate change in the Black Sea region in the 21st century]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, no. 2 (182), pp. 3-14 [in Russ.].

5. Yefimov V.V., Volodin Ye.M., Anisimov A.Ye., Barabanov V.S. Regional'nyye proyeksii izmeneniy klimata v Chernomorsko-Kaspiyskom regione v kontse XXI stoletiya [Regional projections of climate change in the Black Sea-Caspian region at the end of the 21st century]. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, no. 5, vol. 185, pp. 53-72 [in Russ.].

6. Ivanov V.A., Belokopytov V.N. Okeanografiya Chernogo moray [Oceanography of the Black Sea]. Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika publ., 2011, 212 p. [in Russ.].

7. Leonov A.K. Regional'naya okeanografiya. Chast' 1. Beringovo, Okhotskoye, Yaponskoye, Kaspiyskoye i Chernoye moray [Regional oceanography. Part 1. Bering, Okhotsk, Japanese, Caspian and Black Seas]. Leningrad: Gidrometeoizdat publ., 1960, 765 p. [in Russ.].

8. Matishov G.G., Abramenko M.I., Gargopa YU.M., Bufetova M.V. Noveyshiye ekologicheskiye fenomeny v Azovskom more (vtoraya polovina XX veka) [The latest ecological phenomena in the Sea of Azov (second half of the 20th century)]. Apatity: Kol'skiy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk publ., 2003, 441 p. [in Russ.].

9. Pekarnikova M.E., Polonskiy A.B. Analiz realistichnosti dostizheniya osnovnoy tseli Parizhskogo soglasheniya pri sushchestvuyushchey sisteme pravovogo regulirovaniya i kontrolya za antropogennymi vybrosami parnikovykh gazov [Analysis of the realism of achieving the main goal of the Paris Agreement with the existing system of legal regulation and control over anthropogenic greenhouse gas emissions]. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2022, vol. 8, no. 2, pp. 190-208 [in Russ.]. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-2-190-208.

10. Polonsky A.B., Sukhonos P.A. O vosproizvedenii sezonnogo khoda i srednegodovykh osadkov nad Chernym morem po dannym modeley proyekta CMIP6 [On the reproduction of the seasonal cycle and average annual precipitation over the Black Sea using data from the CMIP6 project models]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2025, no. 1 (395), pp. 51-69 [in Russ.]. DOI: 10.37162/2618-9631-2025-1-51-69.

11. Polonskiy A.B., Sukhonos P.A. O vosproizvodimosti tendentsiy izmeneniya osadkov nad Chornym morem modeleyami CMIP6 [On the reproducibility of precipitation change trends over the Black Sea using CMIP6 models]. *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2024, no. 4 (58), pp. 16-27 [in Russ.]. DOI: 10.33075/2220-5861-2024-4-16-27.

12. *Spravochnik po klimatu Chernogo morya* [Guidebook on the climate of the Black Sea]. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1974, 406 p. [in Russ.].

13. Timofeev A.A., Sterin A.M. Using the quantile regression method to analyze changes in climate characteristics. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 310-319. DOI: 10.3103/S106837391005002X.

14. Almazroui M., Islam M.N., Saeed F., Saeed S., Ismail M., Azhar Ehsan M., Diallo I., O'Brien E., Ashfaq M., Martínez-Castro D., Cavazos T., Cerezo-Mota R., Tippett M.K., Gutowski Jr. W.J., Alfaro E.J., Hidalgo H.G., Vichot-Llano A., Campbell J.D., Kamil S., Rashid I.U., Bamba Sylla M., Stephenson T., Taylor M., Barlow M. Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 2021, vol. 5, pp. 1-24. DOI: 10.1007/s41748-021-00199-5.

15. Almazroui M., Saeed F., Saeed S., Islam M.N., Ismail M., Klutse N.A.B., Siddiqui M.H. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 2020, vol. 4, pp. 455-475. DOI: 10.1007/s41748-020-00161-x.

16. Almazroui M., Saeed S., Saeed F., Islam M.N., Ismail M. Projections of precipitation and temperature over the South Asian countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 2020, vol. 4, pp. 297-320. DOI: 10.1007/s41748-020-00157-7.

17. Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, vol. 7, no. 1. pp. 103-113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081.

18. Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblas-Reyes F.J. How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? *Geophysical Research Letters*, 2023, vol. 50. pp. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466.

19. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, vol. 9, no. 5. pp. 1937-1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

20. Eyring V., Cox P.M., Flato G.M., Gleckler P.J., Abramowitz G., Caldwell P., Collins W.D., Gier B.K., Hall A.D., Hoffman F.M., Hurtt G.C., Jahn A., Jones C.D., Klein S.A., Krasting J.P., Kwiatkowski L., Lorenz R., Maloney E., Meehl G.A., Pendergrass A.G., Pincus R., Ruane A.C., Russell J.L., Sanderson B.M., Santer B.D., Sherwood S.C., Simpson I.R., Stouffer R.J., Williamson M.S. Taking climate model evaluation to the next level. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, no. 2. pp. 102-110. DOI: 10.1038/s41558-018-0355-y.

21. GISS. NASA-GISS GISS-E2-1-G-CC model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.11657.

22. Guo H., John J.G., Blanton C., McHugh C., Nikonov S., Radhakrishnan A., Rand K., Zadeh N.T., Balaji V., Durachta J., Dupuis C., Menzel R., Robinson T., Underwood S., Vahlenkamp H., Dunne K.A., Gauthier P.P.G., Ginoux P., Griffies S.M., Hallberg R., Harrison M., Hurlin W.,

Lin P., Malyshev S., Naik V., Paulot F., Paynter D.J., Ploshay J., Schwarzkopf D.M., Seman C.J., Shao A., Silvers L., Wyman B., Yan X., Zeng Y., Adcroft A., Dunne J.P., Held I.M., Krasting J.P., Horowitz L.W., Milly C., Shevliakova E., Winton M., Zhao M., Zhang R. NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output prepared for CMIP6 ScenarioMIP ssp245. Version 20190318. Earth System Grid Federation, 2018. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.9263.

23. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730. pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

24. Jiang J., Zhou T., Chen X., Zhang L. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15, no. 5. pp. 054009. DOI: 10.1088/1748-9326/ab7d03

25. Koenker R. Quantile Regression. *Econometric Society Monographs*. Cambridge, 2005. 349 p.

26. Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z. Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales. *Journal of Marine Systems*, 2006, vol. 60, no. 3-4. pp. 235-254. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2005.11.011.

27. Polonsky A., Belokopytov V., Dzhiganshin G. Low-frequency variability of hydrological fields in the North West Black Sea // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Sensitivity of North Sea, Baltic Sea and Black Sea to Anthropogenic and Climatic Changes (Varna, Bulgaria, 14-18 November 1995): proc. – Varna, 1995.

28. Voldoire A. CNRM-CERFACS CNRM-CM6-1-HR model output prepared for CMIP6 CMIP. Earth System Grid Federation, 2019. DOI: 10.22033/ESGF/CMIP6.1385

29. Yang X.L., Zhou B.T., Xu Y., Han Z.-Y. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, vol. 38, no. 5. pp. 817-830. DOI: 10.1007/s00376-021-0351-4.

Поступила 29.04.2025; одобрена после рецензирования 04.06.2025;
принята в печать 18.06.2025.

Submitted 29.04.2025; approved after reviewing 04.06.2025;
accepted for publication 18.06.2025.