

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-1-51-69>

УДК 551.515.4

## **О воспроизведении сезонного хода и среднегодовых осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6**

*А.Б. Полонский, П.А. Сухонос*

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

Рассмотрено качество воспроизведения сезонного цикла и среднегодовых величин атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем, по данным расчетов, полученных с помощью 36 глобальных численных моделей (173 реализации) из международного проекта Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Результаты расчетов сопоставляются с данными реанализа ERA5 за исторический период 1959–2022 гг. Показано, что большинство моделей проекта CMIP6 неудовлетворительно воспроизводит климатический сезонный ход и среднегодовые величины осадков над Черным морем. В целом, с данными реанализа ERA5 лучше согласуются результаты моделирования зимних осадков. Это свидетельствует о низком качестве параметризации осадков конвективного типа в средних широтах Северного полушария в большей части моделей из консорциума CMIP6. Отобраны 5 моделей из 36, которые можно использовать для оценки среднегодовых величин осадков над Черным морем, из них только 3 целесообразно использовать для оценки месячных осадков.

*Ключевые слова:* атмосферные осадки, сезонный ход, Черное море, CMIP6

## **Reproducibility of seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea from CMIP6 models**

*A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos*

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

The quality of simulation of the seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea is considered using the calculations of 36 global numerical models (173 realizations) from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The calculation results are compared with the ERA5 reanalysis data for the historical period of 1959–2022. It is shown that most of the CMIP6 models poorly simulate the climatic seasonal cycle and annual amount of precipitation over the Black Sea. In general, the results of modeling winter precipitation are more consistent with the ERA5 reanalysis data than summer precipitation. This indicates a low quality of parameterization of convective precipitation in the Northern Hemisphere midlatitudes in most of the CMIP6 models. Five of 36 models that can be used for estimating annual precipitation over the Black Sea are selected, and only three of the models can be used to estimate monthly precipitation.

*Keywords:* precipitation, seasonal cycle, Black Sea, CMIP6

## Введение

Изучение вероятных изменений климата в 21 веке предполагает детальный анализ современного климатического режима на региональных масштабах [2]. В последнее время достигнут существенный прогресс в мультимодельном подходе к численному моделированию изменений климата [12]. Однако оценки климатических параметров на региональных масштабах (особенно в регионах с большой неоднородностью подстилающей поверхности) все еще характеризуются большим разбросом и требуют уточнения [1].

Наиболее неопределенным оцениваемым параметром, важным с точки зрения его влияния на гидролого-гидрохимический режим морских акваторий, являются осадки. В настоящее время вопрос о качестве воспроизведения характеристик атмосферных осадков во многих регионах земного шара по данным климатических моделей остается открытым. Анализ способности глобальных климатических моделей международного проекта Coupled Model Intercomparison Project Phase (CMIP6) воспроизводить осадки показал сильные различия между модельными расчетами и данными натурных измерений в разных географических регионах и климатических зонах мира [10, 14, 15]. В частности, почти все численные модели переоценивают глобальные месячные осадки над сушей, за исключением региона Юго-Восточной Азии и тропических широт, где модели, наоборот, их недооценивают.

Сезонный цикл атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем, изучен достаточно хорошо (см., например, [3–5, 8] и др.). В этих работах показано, что наибольшее количество осадков в указанном регионе выпадает в осенне-зимний период (с сентября по февраль). Среднегодовой максимум атмосферных осадков отмечается в декабре. Наименьшее количество осадков выпадает в весенне-летний период.

В данной работе описываются результаты сравнения сезонного хода атмосферных осадков над Черным морем по данным расчетов, полученных с помощью численных моделей, входящих в проект CMIP6, с данными атмосферного реанализа. В нашем случае использовались данные реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Данные указанного реанализа верифицированы авторами статьи с помощью данных инструментальных наблюдений за осадками в Северном Крыму в работе [7].

Использование данных реанализа, усваивающего натурные и дистанционные наблюдения и с достаточной степенью точности описывающего погодно-климатические условия прошлых десятилетий, позволяет, с определенными ограничениями, сделать выводы о качестве воспроизведения сезонного хода осадков, выпадающих над Черным морем, по данным глобальных климатических моделей из проекта CMIP6 в исторический период.

## Данные и методы

Использованы данные 36 численных моделей, которые входят в международный проект сравнения моделей климата CMIP6 [11]. Выбор этих моделей обусловлен наличием данных о месячных величинах атмосферных осадков, выраженных в мм, в исторический период (всего 173 реализации). Список используемых в работе моделей и их основные характеристики приведены в таблице. Данные получены из источника открытого доступа (<https://climexp.knmi.nl/>). Горизонтальное разрешение численных моделей изменяется от  $0,5-0,7^\circ$  (модели CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3 и др.) до  $2,5-2,8^\circ$  (модели CanESM5, MIROC-ES2L и др.). Для сравнения с модельными результатами привлекались данные реанализа ERA5 с пространственным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  [13]. Использовались данные численных экспериментов и реанализа за исторический период 1959–2022 гг. для региона, охватывающего всю акваторию Черного моря ( $40-48^\circ$  с. ш.,  $26-42^\circ$  в. д.).

По исходным данным о количестве атмосферных осадков для каждой реализации всех численных моделей и реанализа ERA5 рассчитаны медиана и ее доверительный интервал на уровне 99 % для каждого месяца и среднегодовые величины в рассматриваемый период. Анализ медианных значений количества осадков обусловлен тем, что величины атмосферных осадков характеризуют случайный процесс, существенно отличный от простого гауссовского процесса [6].

## Результаты

По данным реанализа ERA5 медиана среднегодовых величин месячных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря в исследуемый период, находится в диапазоне от 39,9 до 45,1 мм на доверительном уровне 99 %. Сезонный цикл осадков характеризуется минимумом в июле и максимумом в декабре. Доверительный интервал медианы осадков на уровне 99 % в эти месяцы составляет 14,9–30,7 и 58,2–74,9 мм соответственно. Количество осадков, выпадающих в холодный период года, в 2,5–3 раза превышает количество осадков, выпадающих в теплый период. В целом, это согласуется с известными представлениями о внутригодовом распределении осадков в исследуемом регионе [3, 4, 7, 8].

Перейдем к описанию качества воспроизведения сезонного хода и климатической величины месячных атмосферных осадков над Черным морем по данным моделей проекта CMIP6 в рассматриваемый период.

Климатические модели ACCESS-CM2 и ACCESS-ESM1-5 некорректно воспроизводят внутригодовой ход медианы осадков над Черным морем (рис. 1а). По данным этих моделей сезонная изменчивость осадков характеризуется выраженным максимумом в мае (в диапазоне 75–90 мм по разным реализациям) и минимумом в августе (8–17 мм), что никак не согласуется с данными реанализа ERA5 (24 и 22 мм соответственно).

**Таблица.** Используемые модели CMIP6, их основные характеристики и количество реализаций**Table.** CMIP6 models used, their main parameters and number of the runs

№ п/п	Модели	Страна	Шаг по долготе, град.	Шаг по широте, град.	Колич. реализаций
1	ACCESS-CM2	Австралия	1,875	1,25	3
2	ACCESS-ESM1-5	Австралия	1,875	1,25	3
3	AWI-CM-1-1-MR	Германия	0,937	0,935	1
4	BCC-CSM2-MR	Китай	1,125	1,121	1
5	CAMS-CSM1-0	Китай	1,125	1,121	2
6	CanESM5 p1	Канада	2,813	2,791	25
7	CanESM5 p2	Канада	2,813	2,791	25
8	CanESM5-CanOE p2	Канада	2,813	2,791	3
9	CESM2	США	1,25	0,942	6
10	CESM2-WACCM	США	1,25	0,942	3
11	CMCC-CM2-SR5	Италия	1,25	0,942	1
12	CNRM-CM6-1 f2	Франция	1,406	1,401	6
13	CNRM-CM6-1-HR f2	Франция	0,5	0,5	1
14	CNRM-ESM2-1 f2	Франция	1,406	1,401	5
15	EC-Earth3	Евросоюз	0,703	0,702	21
16	EC-Earth3-Veg	Евросоюз	0,703	0,702	5
17	FGOALS-f3-L	Китай	1,25	1	1
18	FGOALS-g3	Китай	2	2,025	4
19	FIO-ESM-2-0	Китай	1,25	0,942	3
20	GFDL-CM4	США	1,25	1	1
21	GFDL-ESM4	США	1,25	1	3
22	GISS-E2-1-G p3	США	2,5	2	5
23	HadGEM3-GC31-LL f3	Великобритания	1,875	1,25	1
24	INM-CM4-8	Россия	2	1,5	1
25	INM-CM5-0	Россия	2	1,5	1
26	IPSL-CM6A-LR	Франция	2,5	1,268	11
27	KACE-1-0-G	Южная Корея	1,875	1,25	3
28	MIROC6	Япония	1,406	1,401	3
29	MIROC-ES2L f2	Япония	2,813	2,791	1
30	MPI-ESM1-2-HR	Германия	0,938	0,935	2
31	MPI-ESM1-2-LR	Германия	1,875	1,865	10
32	MRI-ESM2-0	Япония	1,125	1,121	1
33	NESM3	Китай	1,875	1,865	2
34	NorESM2-LM	Норвегия	2,5	1,895	3
35	NorESM2-MM	Норвегия	1,25	0,942	1
36	UKESM1-0-LL f2	Великобритания	1,875	1,25	5

Значения медианы осадков с октября по февраль находятся в пределах 99 % доверительного интервала медианы, за исключением двух реализаций в декабре. Среднегодовые величины месячных модельных осадков значимо завышены (на 99 % доверительном уровне).

Внутригодовой ход медианных осадков по данным других климатических моделей в целом описывает наблюдаемую тенденцию увеличения осадков зимой и их уменьшения летом. Однако количественное соответствие между результатами расчетов по большинству прогностических моделей и данными реанализа отсутствует. Покажем это путем прямого сравнения соответствующих величин медианных осадков.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели AWI-CM-1-1-MR характеризуется максимумом зимой и минимумом летом (рис. 1а). Но по данным этой модели величины медианы осадков в январе завышены (74 мм), а с мая по октябрь занижены (5 мм) по сравнению с величинами медианы осадков, рассчитанными по данным реанализа ERA5. Хорошее согласие величин медианы осадков с данными реанализа отмечается только в ноябре и декабре. В целом, описанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели BCC-CSM2-MR также характеризуется зимним максимумом и летним минимумом (рис. 1а). При этом по данным этой модели величины медианы осадков завышены с октября по январь и занижены с июня по август. С февраля по май отмечается хорошее согласие средних величин медианы осадков с данными реанализа. Указанное распределение величин медианы осадков в сезонном ходе приводит к совпадению диапазона медианы среднегодовых величин месячных осадков, рассчитанных по данным этой модели и с использованием результатов реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CAMS-CSM1-0 в принципе описывает и зимний максимум, и летний минимум (рис. 1а). Причем по данным этой модели величины медианы осадков с октября по апрель находятся в пределах доверительного интервала медианы осадков, оцененного по данным реанализа, но с мая по сентябрь они существенно занижены. Согласно результатам моделирования, количество осадков, выпадающих в июле, составляет менее 5 мм, а по данным реанализа – более 15 мм. Полученный в модельных расчетах внутригодовой ход величин медианы месячных осадков приводит к значимому занижению их среднегодовых значений.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатических моделей CanESM5-p1 и CanESM5-p2 также описывает зимний максимум и летний минимум (рис. 1д–з). Причем по большинству реализаций обеих версий этой модели отмечается хорошее согласие средних величин медианы осадков с данными реанализа с октября по март. Исключения составляют реализация *ens23* для версии модели *p1* в декабре (завышает количество осадков), реализация *ens23* для версии модели *p2* в декабре (занижает) и реализация *ens15* для версии модели *p2* в феврале (занижает).

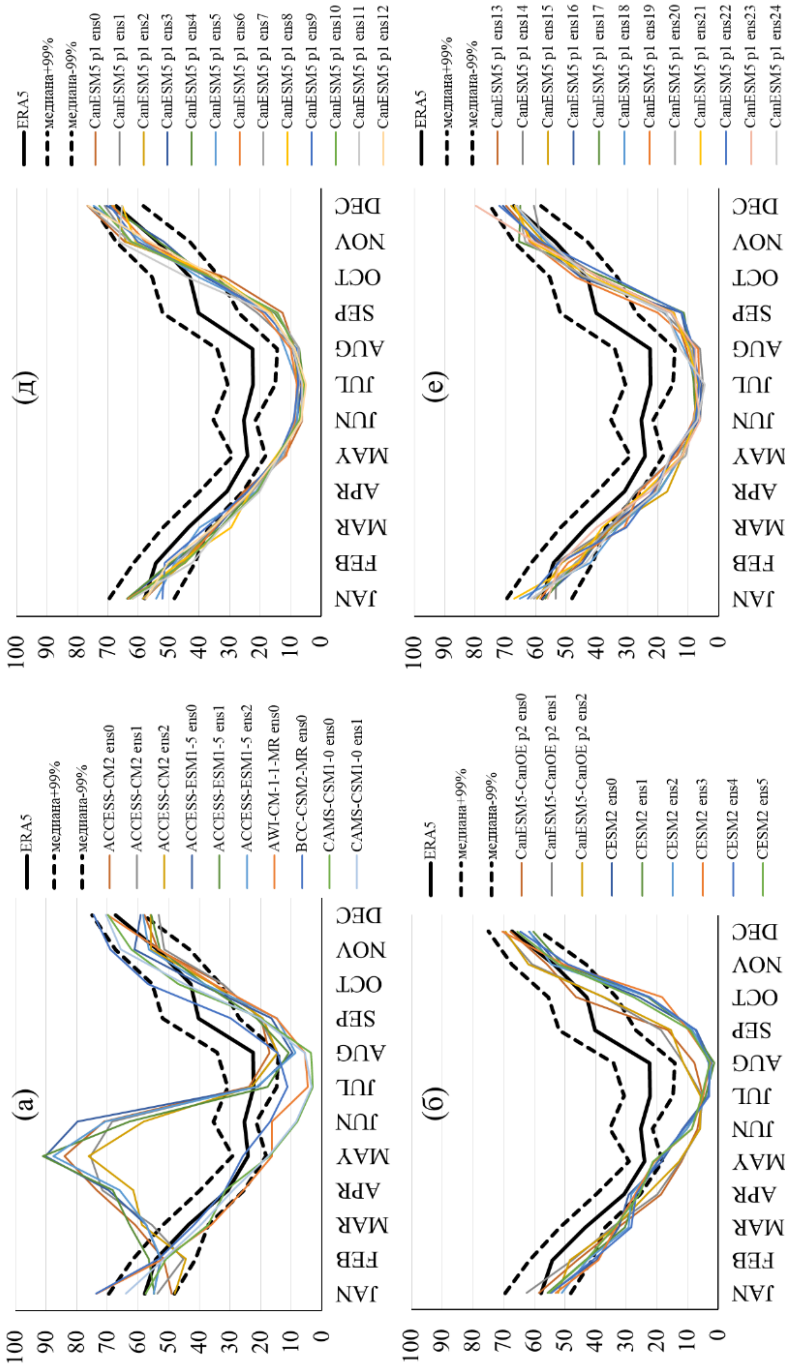
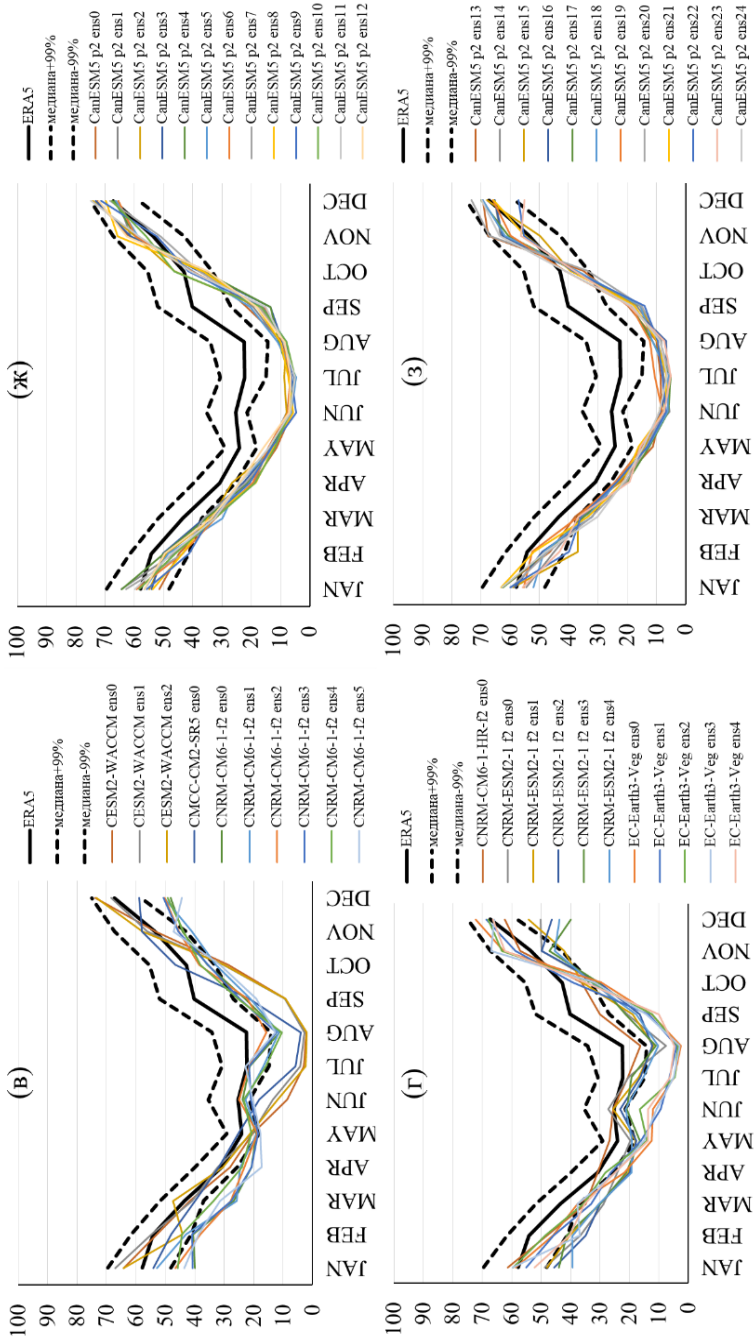


Рис. 1. Сезонный цикл месячных осадков (мм), выпадающих над Черным морем, по данным атмосферного реанализа ERA5 (сплошная черная линия) и реализацией численных моделей проекта SMIP6 (тонкие цветные линии). Пунктирными черными линиями показан доверительный интервал для медианы осадков по данным ERA5 на уровне 99 %.



**Fig. 1.** Seasonal cycle of monthly precipitation (mm) over the Black Sea based on ERA5 atmospheric reanalysis data (solid black line) and CMIP6 numerical model implementations (thin colored lines). The dashed black lines show the confidence interval for the median precipitation based on ERA5 data at the 99 % level.

Вместе с тем реализации этой модели занижают величины медианы осадков с апреля по сентябрь. Согласно данным большинства реализаций этих моделей, количество осадков, выпадающих в июне, июле и августе составляет менее 10 мм. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков для всех реализаций.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CanESM5-CanOE p2 характеризуется хорошим согласием средних величин медианы осадков с данными реанализа с октября по февраль, но все реализации этой модели занижают величины медианы осадков с марта по сентябрь (рис. 1б). По данным этой модели количество осадков, выпадающих в июне и июле, составляет около 5 мм. Указанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков для всех реализаций.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным всех реализаций климатической модели CESM2 находится в пределах 99 % доверительного интервала медианы осадков, оцененного по данным реанализа с ноября по январь и в апреле–мае. В феврале величины медианы осадков для большинства реализаций этой модели занижены. В марте и с июня по октябрь величины медианы осадков занижены для всех реализаций модели CESM2. Согласно данным этой модели, количество осадков, выпадающих в июле–августе, составляет менее 5 мм, что более чем в 3 раза меньше, чем по данным реанализа (рис. 1б). Описанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков, оцененных по данным модельных расчетов.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CESM2-WACCM неплохо соответствует данным реанализа с ноября по май (рис. 1в). Вместе с тем с июня по октябрь величины медианы осадков занижены для всех реализаций этой модели. Согласно модельным данным количество осадков, выпадающих в июле–августе, составляет менее 3 мм, а по данным реанализа – оно более чем в 5 раз превышает эту величину. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели CMCC-CM2-SR5 и результатам реанализа совпадает с октября по май в пределах 99 % доверительного интервала (рис. 1в). С июня по сентябрь модельные величины медианы осадков занижены. Причем количество осадков, выпадающих в июле–августе, по данным модели CMCC-CM2-SR5 более чем в 3 раза занижает величину осадков, рассчитанных для этих месяцев по данным реанализа. Указанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к некоторому занижению среднегодовых величин месячных осадков, но оно незначимо на доверительном уровне 99 %.

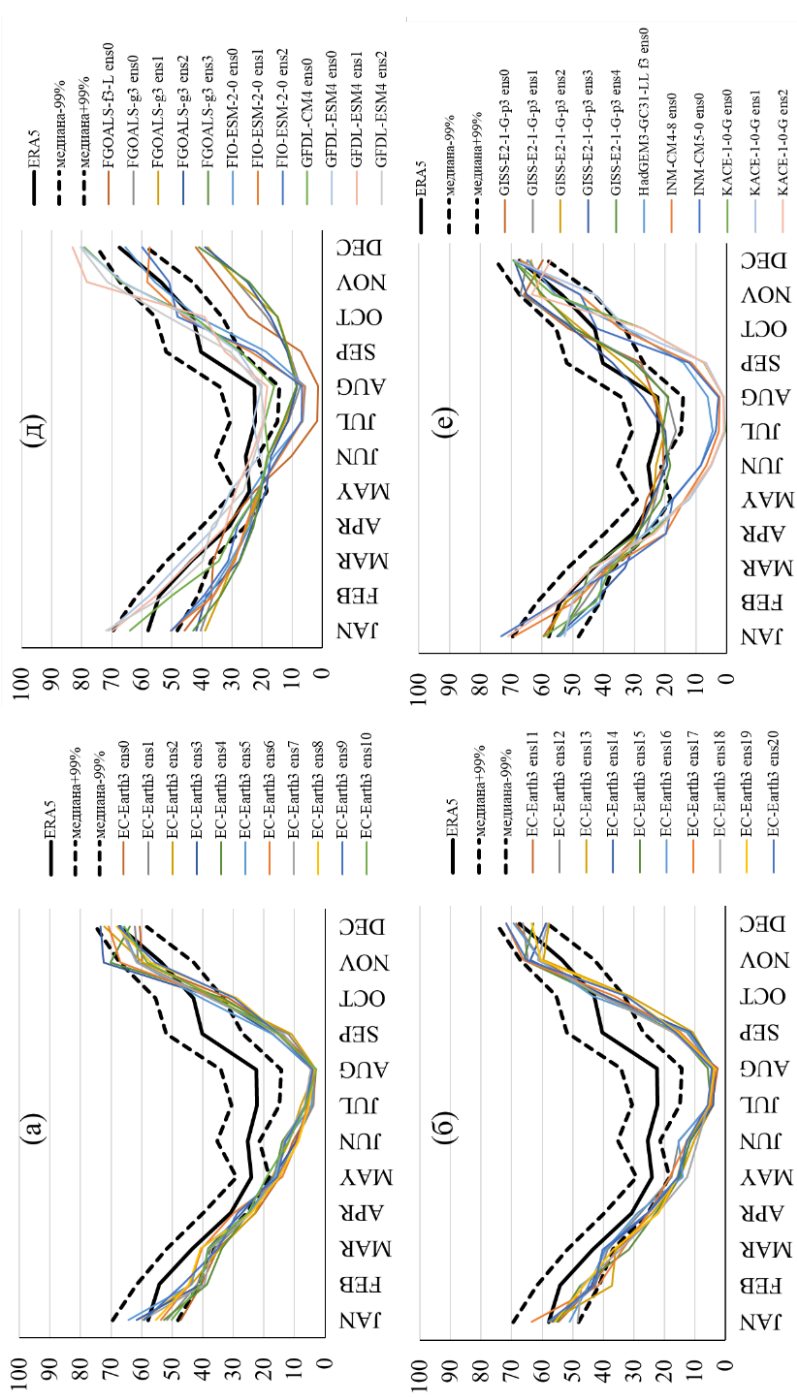
Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CNRM-CM6-1-f2 характеризуется минимумом в августе и максимумом в январе (рис. 1в). Все реализации этой модели, кроме реализации *ens1*, занижают величину медианы осадков в январе, марте, апреле, сентябре и декабре. В остальные месяцы величины медианы осадков находятся в интервале от медианного значения до нижней границы 99 % доверительного уровня. Обнаруженное распределение величин медианы осадков в сезонном ходе приводит к совпадению среднегодовых величин месячных осадков по данным этой модели и реанализа. Эту климатическую модель можно считать удовлетворительно воспроизводящей внутригодовой ход атмосферных осадков над акваторией Черного моря, если не учитывать значимого занижения величин медианы осадков в отдельные месяцы.

В целом, внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели CNRM-CM6-1-HR f2 находится в хорошем соответствии с сезонным ходом медианы осадков по данным ERA5 (рис. 1г). Исключение составляет величина медианы осадков в марте, которая по данным этой модели значимо занижена (34,8 мм) по сравнению с реанализом (43,5 мм). Среднегодовые величины месячных осадков также хорошо согласуются с данными реанализа.

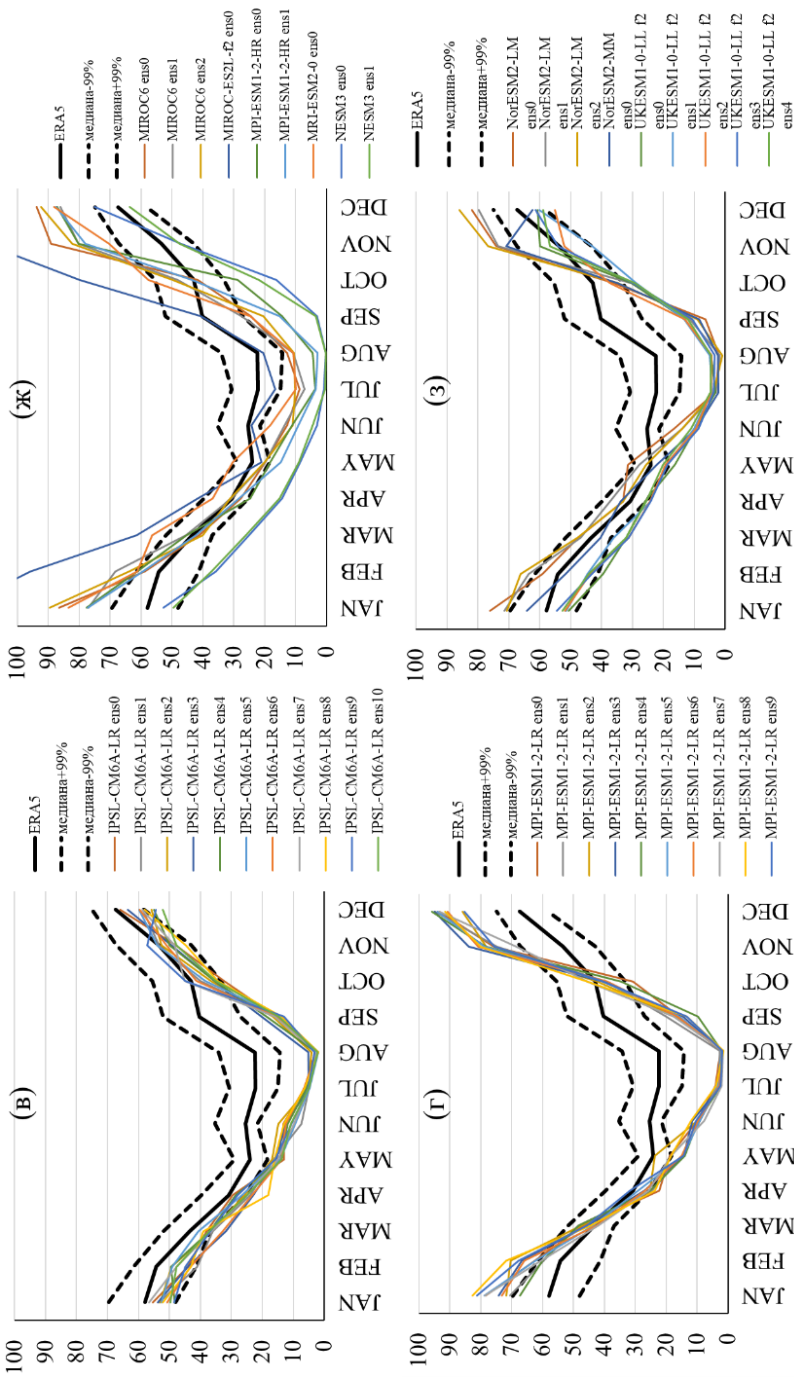
Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели CNRM-ESM2-1 f2 качественно согласуется с внутригодовым ходом медианы осадков по данным ERA5, но модельные величины медианы осадков занижены (рис. 1г). Все реализации этой модели значимо занижают медиану осадков в марте, апреле, августе, сентябре, октябре и декабре. Величина медианы осадков по реализациям этой модели в июне (кроме *ens4*) и ноябре (кроме *ens1*) находится в пределах 99 % доверительного уровня, оцененного по данным реанализа. Разброс медианы осадков по реализациям этой модели составляет от 39,9 мм (*ens3*) до 54,4 мм (*ens1*). При этом величина медианы осадков в декабре по данным ERA5 равна 67,4 мм. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатических моделей EC-Earth3 (рис. 2а, б) и EC-Earth3-Veg (рис. 1г) характеризуется минимумом в августе и максимумом в декабре. Величина медианы осадков с мая по сентябрь значимо занижена во всех реализациях этих моделей. В июле–августе эти величины составляют менее 5 мм. Величина медианы осадков по всем реализациям модели EC-Earth3 в январе (кроме *ens0*) и декабре соответствует данным реанализа (в пределах 99 % доверительного уровня). С февраля по апрель количество реализаций, которые занижают величину медианы осадков, увеличивается.

Величина медианы осадков в ноябре по реализациям *ens3* и *ens4* этой модели завышена, а с ноября по январь по всем реализациям модели EC-Earth3-Veg находится в пределах 99 % доверительного уровня, рассчитанного по данным реанализа.



**Рис. 2.** Сезонный цикл месячных осадков (мм), выпадающих над Черным морем, по данным атмосферного реанализа ERA5 (сплошная черная линия) и реализаций численных моделей проекта SMIP6 (тонкие цветные линии). Пунктирными черными линиями показан доверительный интервал для медианы осадков по данным ERA5 на уровне 99 %.



**Fig. 2.** Seasonal cycle of monthly precipitation (mm) over the Black Sea based on ERA5 atmospheric reanalysis data (solid black line) and CMIP6 numerical model implementations (thin colored lines). The dashed black lines show the confidence interval for the median precipitation based on ERA5 data at the 99 % level.

Указанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков во всех реализациях этой модели.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели FGOALS-f3-L характеризуется минимумом в июле–августе (менее 2 мм) и максимумом в январе (рис. 2д). Величина медианы осадков занижена во все месяцы, кроме апреля (32 мм) и мая (22,5 мм). Среднегодовые величины месячных осадков также значимо занижены по сравнению с данными реанализа.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели FGOALS-g3 указывает на минимум в августе и максимум в декабре–январе (около 40 мм) (рис. 2д). Величина медианы осадков значимо занижена во все месяцы, кроме мая. Сравнение модельных результатов с данными реанализа показывает, что среднегодовые величины месячных осадков также некорректно воспроизводятся по всем реализациям этой модели.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели FIO-ESM-2-0 характеризуется минимумом в июле–августе и максимумом в декабре (рис. 2д). Величина медианы осадков по всем реализациям этой модели с октября по январь, в апреле (кроме *ens0*) и мае находится в пределах 99 % доверительного уровня, оцененного по данным реанализа. При этом медиана среднегодовых величин месячных осадков значимо занижена во всех реализациях этой модели.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели GFDL-CM4 указывает на минимум в августе и максимум в декабре (рис. 2д). По сравнению с данными реанализа величина медианы осадков занижена в марте и июне и завышена в декабре (79,2 мм). При этом среднегодовые величины месячных модельных осадков хорошо согласуются с данными реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели GFDL-ESM4 характеризуется летним минимумом и зимним максимумом (рис. 2д). При этом величины медианы осадков завышены в декабре (79,9–81,1 мм) и январе (69,8–72,0 мм) по сравнению с данными реанализа (67,4 и 57,9 мм в декабре и январе соответственно). В летние месяцы величины осадков по данным этой модели неплохо согласуются с данными реанализа. Обнаруженное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к небольшому завышению среднегодовых величин месячных осадков во всех реализациях этой модели, но оно статистически незначимо.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели GISS-E2-1-G r3 также правильно описывает понижение величин осадков летом и их повышение зимой (рис. 2е). При этом медиана осадков занижена в марте (по реализации *ens3*) и июне (по реализациям *ens3* и *ens4*). Величины медианы осадков в остальные месяцы по всем реализациям этой модели находятся в пределах 99 % доверительного уровня,

рассчитанного по данным реанализа. В целом среднегодовые величины месячных модельных осадков и осадков, полученных по данным реанализа, неплохо соответствуют друг другу.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели HadGEM3-GC31-LL f3 на качественном уровне правильно описывает летнее понижение и зимнее повышение количества осадков (рис. 2е). При этом величины медианы модельных месячных осадков значительно занижены с мая по октябрь, а также в среднем за год по сравнению с данными реанализа.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатических моделей INM-CM4-8 и INM-CM5-0 также характеризуется летним минимумом и зимним максимумом (рис. 2е). При этом модель INM-CM4-8 занижает величины медианы осадков с апреля по сентябрь, а модель INM-CM5-0 завышает величины медианы осадков в январе и занижает с марта по сентябрь. В зимние месяцы величины медианы осадков по данным этих моделей находятся в удовлетворительном согласии с данными реанализа. В целом, отмечается значимое занижение среднегодовых величин месячных осадков по данным этих моделей по сравнению с данными реанализа.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели IPSL-CM6A-LR правильно описывается только для части холодного периода года (рис. 2в). Величины медианы осадков в январе, феврале и ноябре по всем реализациям этой модели находятся в пределах 99 % доверительного интервала, рассчитанного по данным реанализа. С мая по сентябрь, а также в среднем за год величины медианы месячных осадков значительно занижены по сравнению с данными реанализа.

Во внутригодовом ходе медианы осадков по данным климатической модели KACE-1-0-G количество осадков значительно занижено с апреля по октябрь, а в июле и августе вообще отмечаются близкие к нулевым величины медианы осадков (рис. 2е). В январе величина медианы осадков по реализации *ens2* завышена. Описанное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому занижению среднегодовых величин модельных месячных осадков по сравнению с данными реанализа.

В сезонном ходе медианы осадков по данным климатической модели MIROC6 количество осадков значительно завышено с ноября по февраль (рис. 2ж). С июня по сентябрь величины медианы осадков, напротив, значительно занижены по сравнению с данными реанализа. С марта по май и в октябре величины медианы осадков по всем реализациям этой модели соответствуют данным реанализа (в пределах 99 % доверительного уровня). Завышение величины медианы месячных осадков зимой и занижение летом приводит к хорошему согласию среднегодовых величин осадков по данным этой модели с величинами осадков, полученными по данным реанализа.

Внутригодовой ход осадков по данным климатической модели MIROC-ES2L f2 характеризуется существенным завышением величины медианы осадков в период с октября по апрель (рис. 2ж). Максимум

осадков (128 мм) отмечается в декабре, что почти в 2 раза превышает осадки, полученные по данным реанализа. С мая по сентябрь величины медианы осадков по данным этой модели и реанализа хорошо совпадают. Полученное распределение величин медианы осадков во внутригодовом ходе приводит к значимому завышению среднегодовых величин месячных осадков по данным этой модели.

Сезонный ход осадков по данным климатической модели MPI-ESM1-2-HR характеризуется значимым завышением величины медианы осадков в период с ноября по январь по сравнению с данными реанализа (рис. 2ж). С мая по сентябрь эти величины, напротив, значимо занижены, причем в июле–августе они составляют менее 5 мм. Величины медианы мартовских осадков, оцененные по данным модели и реанализа, хорошо согласованы, так же как и среднегодовые величины осадков.

Внутригодовой ход осадков по данным климатической модели MPI-ESM1-2-LR завышает медиану осадков в период с ноября по февраль (за исключением реализации *ens4* в январе и феврале, рис. 2г). С мая по сентябрь величины медианы модельных осадков значимо занижены, за исключением реализации *ens2* в мае. Минимум медианы осадков отмечается в августе, когда ее величина составляет менее 3 мм. В результате среднегодовые величины месячных осадков по данным всех реализаций рассматриваемой модели соответствуют величинам осадков, полученным по данным реанализа ERA5.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели MRI-ESM2-0 характеризуется минимумом в июле–августе (10 мм) и максимумом в декабре–январе (83–88 мм) (рис. 2ж). С ноября по январь, в марте и мае величины медианы осадков значимо завышены, а с июня по сентябрь эти величины, напротив, занижены. Так же, как и в случае с моделью MPI-ESM1-2-LR, среднегодовые величины модельных месячных осадков соответствуют величинам осадков по данным ERA5.

Внутригодовой ход медианы осадков по данным климатической модели NESM3 находится в неплохом соответствии с данными реанализа в период с ноября по январь (рис. 2ж). В остальные месяцы модельные величины медианы осадков существенно занижены. В июле и августе величины медианы осадков по данным этой модели вообще близки к нулю. Описанное внутригодовое распределение величин медианы осадков приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков по данным рассматриваемой модели.

Сезонный ход медианы осадков по данным климатической модели NorESM2-LM верно указывает на летнее понижение и зимнее повышение количества выпадающих осадков (рис. 2з). Но при этом с ноября по февраль величины медианы осадков значимо завышены, а с июня по сентябрь эти величины, наоборот, занижены. В марте–апреле величины медианы модельных осадков находятся в пределах 99 % доверительного уровня, оцененного по данным реанализа. Такой сезонный ход величины медианы

месячных осадков приводит к согласию среднегодовых величин модельных осадков с величинами осадков, рассчитанными по данным ERA5. По данным климатической модели NorESM2-MM величины медианы осадков соответствуют данным реанализа в октябре и с декабря по май (рис. 2з). В ноябре модельные величины значимо завышены, а в период с июня по сентябрь, напротив, значимо занижены. Причем в июле–августе эти величины составляют менее 3 мм. В результате по данным этой модели медиана среднегодовых величин месячных осадков значимо занижена.

Наконец, внутригодовой ход осадков по данным климатической модели UKESM1-0-LL f2 характеризуется величинами медианы в окрестности нижней границы 99 % доверительного уровня медианы осадков, оцененного по данным реанализа в период с января по май (рис. 2з). С июня по октябрь (за исключением реализации *ens2* в октябре) величины медианы осадков по данным этой модели значимо занижены. С ноября по декабрь, за исключением реализаций *ens1* в ноябре и *ens2* в декабре, величины медианы осадков соответствуют данным реанализа. Полученный внутригодовой ход величин медианных осадков приводит к значимому занижению среднегодовых величин месячных осадков по данным этой модели.

### Выводы

Проведенный анализ позволил систематизировать численные модели проекта CMIP6 по их способности воспроизводить сезонный ход атмосферных осадков над Черным морем в исторический период (1959–2022 гг.).

Выявлены следующие группы моделей.

Модели, в принципе некорректно воспроизводящие внутригодовой цикл осадков: ACCESS-CM2 и ACCESS-ESM1-5.

Модели, удовлетворительно воспроизводящие величины осадков в зимний сезон и занижающие величины осадков летом, что приводит к занижению среднегодовых величин месячных осадков: AWI-CM-1-1-MR, CAMS-CSM1-0, CanESM5-p1 и CanESM5-p2, CanESM5-CanOE p2, CESM2, CESM2-WACCM, CMCC-CM2-SR5, EC-Earth3 и EC-Earth3-Veg, FIO-ESM-2-0, HadGEM3-GC31-LL f3, INM-CM4-8 и INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, KACE-1-0-G, NESM3, NorESM2-MM и UKESM1-0-LL f2.

Модели, завышающие величины осадков в зимний сезон и занижающие величины осадков летом, что приводит к удовлетворительному воспроизведению среднегодовых величин месячных осадков: BCC-CSM2-MR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0 и NorESM2-LM.

Модели, занижающие величины осадков и в зимний, и в летний сезоны, что приводит к существенному занижению среднегодовых величин месячных осадков: CNRM-ESM2-1 f2, FGOALS-f3-L и FGOALS-g3.

Модель, завышающая величины осадков в зимний сезон и удовлетворительно воспроизводящая величины осадков летом, что приводит к завышению среднегодовых величин месячных осадков: MIROC-ES2L f2.

Модели CNRM-CM6-1 f2 и GFDL-ESM4, удовлетворительно воспроизводящие сезонный ход осадков в изучаемом регионе, но значимо занижающие или завышающие величины осадков в отдельные месяцы.

Климатические модели CNRM-CM6-1-HR f2, GFDL-CM4 и GISS-E2-1-G r3 хорошо воспроизводят внутригодовой цикл осадков над Черным морем. Как следствие, в хорошем согласии с данными реанализа ERA5 находятся и среднегодовые величины месячных региональных осадков, рассчитанные по данным этих моделей. Конечно, этот вывод касается моделирования осадков, осредненных по всему рассматриваемому региону. Для того, чтобы адекватно описывать осадки, выпадающие в окрестности орографических особенностей подстилающей поверхности с пространственными масштабами порядка 100 км (типа Крымских гор) и более мелкомасштабных неоднородностей, необходимо применять даунскейлинг.

Таким образом, большинство численных моделей проекта CMIP6 неудовлетворительно воспроизводит климатический сезонный ход и среднегодовые величины месячных атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем. В целом, результаты моделирования зимних осадков лучше согласуются с данными реанализа ERA5, чем летних. Это свидетельствует о неадекватной параметризации конвективных осадков в большинстве моделей проекта CMIP6. Поэтому можно заключить, что использование мультимодельного осреднения по всему массиву моделей CMIP6 (без корректировки результатов моделирования) может давать неверный результат при анализе сезонного цикла и среднегодовых величин атмосферных осадков в рассматриваемом регионе. Самый простой способ избежать искусственного завышения или занижения моделируемых осадков, а также добиться уменьшения их разброса, заключается в использовании только тех моделей, которые адекватно отражают известные из наблюдений региональные климатические особенности режима осадков для контрольного периода. Аналогичный подход использован в работе [9] при анализе данных сценарных расчетов, выполненных в рамках проекта CMIP5.

Необходимо отметить, что приведенный выше вывод о неудовлетворительной параметризации конвективных осадков в большинстве моделей проекта CMIP6, основанный на результатах анализа расчетов количества региональных осадков, подтверждает один из основных выводов работы авторов [7] относительно качества моделирования осадков над Черным морем. В этой работе на основании анализа данных по расчету количества региональных осадков, выполненному в рамках проекта CORDEX с входными данными из ансамбля реализаций глобальных климатических моделей проекта CMIP5, было показано, что параметризация осадков конвективного типа в подавляющем большинстве моделей неудовлетворительна и нуждается в совершенствовании. К сожалению, несмотря на развитие глобальных климатических моделей, в целом приводящее к последовательному улучшению качества воспроизведения климатических характеристик, осадки конвективного типа над Черным морем все еще моделируются недостаточно качественно.

Авторы статьи выражают благодарность 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 СМIP6 // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8, № 4. С. 424–440. DOI: 10.21513/2410-8758-2022-4-424-440
2. *Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Корнева И.А.* Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 5. С. 29–45.
3. *Белокопытов В.Н.* Климатические изменения гидрологического режима Черного моря: Дис. ... докт. геогр. наук. Севастополь: МГИ РАН, 2017. 377 с.
4. *Гидрометеорология* и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоиздат, 1991. 430 с.
5. *Ефимов В.В., Белокопытов В.Н., Анисимов А.Е.* Оценка составляющих водного баланса Черного моря // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 12. С. 69–76.
6. *Ефимов В.В., Шакалова Е.С.* О формировании атмосферных сезонных осадков в Черноморском регионе // *Морской гидрофизический журнал*. 2008. № 4. С. 43–51.
7. *Полонский А.Б., Сухонос П.А.* Расчет климатических характеристик осадков над Черным морем по данным региональных климатических моделей // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2023. № 3 (389). С. 59–74. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-3-59-74
8. *Репетин Л.Н., Долотов В.В., Липченко М.М.* Пространственно-временная и климатическая изменчивость атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон*. 2006. Т. 14. С. 462–476.
9. *Basharin D., Polonsky A., Stankunavicius 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
10. *Donat M.G., Delgado-Torres C., De Luca P., Mahmood R., Ortega P., Doblado-Reyes F.J.* How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? // *Geophys. Res. Lett.* 2023. Vol. 50, no. 14. P. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466
11. *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.
12. *Eyring V., Gillett N.P., Achuta Rao K.M., Barimalala R., Barreiro Parrillo M., Bellouin N., Cassou C., Durack P.J., Kosaka Y., McGregor S., Min S., Morgenstern O., Sun Y.* Human Influence on the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, P. 423–552. DOI: 10.1017/9781009157896.005
13. *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

14. Li Z., Liu T., Huang Y., Peng J., Ling Y. Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land // *Earth's Future*. 2022. Vol. 10, no. 8. P. e2021EF002500. DOI: 10.1029/2021EF002500

15. Yazdandoost F., Moradian S., Izadi A., Aghakouchak A. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison // *Atmospheric Res.* 2021. Vol. 250. P. 105369. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105369

## 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. Bardin M.Y., Ran'kova E.Y., Platova T.V., Samokhina O.F., Korneva I.A. Modern surface climate change as inferred from routine climate monitoring data. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, pp. 317-329 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373920050027

3. Belokopytov V.N. Klimaticheskiye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Chernogo morya: Diss. doct. geogr. nauk [Climatic changes in the hydrological regime of the Black Sea]: Doct. geogr. sci. thesis, Sevastopol: MGI, 2017, 377 p. [in Russ.].

4. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR. T.IV. Chernoye more. Vyp.1. Gidrometeorologicheskiye 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.].

5. Efimov V.V., Belokopytov V.N., Anisimov A.E. Estimation of water balance components in the Black Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2012, vol. 37, pp. 769-774 [in Russ.]. DOI: 10.3103/S1068373912110118

6. Efimov V.V., Shakalova E.S. On the formation of atmospheric seasonal precipitation in the Black Sea region. *Phys. Oceanogr.*, 2008, vol. 18, pp. 204-211. DOI: 10.1007/s11110-008-9022-6.

7. Polonsky A.B., Sukhonos P.A. Raschot klimaticheskikh kharakteristik osadkov nad Chornym morem po dannym regional'nykh klimaticheskikh modeley [Calculation of climatic characteristics of precipitation over the Black Sea based on data from regional climate models]. *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2023, no. 3 (389), pp. 59-74 [in Russ.]. DOI: 10.37162/2618-9631-2023-3-59-74

8. Repetin L.N., Dolotov V.V., Lipchenko M.M. Prostranstvenno-vremennaya i klimaticheskaya izmenchivost' atmosferykh osadkov, vypadayushchikh na poverkhnost' Chernogo moray [Spatial-temporal and climatic variability of atmospheric precipitation falling on the surface of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon*, 2016, vol. 14, pp. 462-476 [in Russ.].

9. Basharin D., Polonsky A., Stankunavicius 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

10. 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, no. 14. pp. e2022GL102466. DOI: 10.1029/2022GL102466

11. 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.

12. Eyring V., Gillett N.P., Achuta Rao K.M., Barimalala R., Barreiro Parrillo M., Bellouin N., Cassou C., Durack P.J., Kosaka Y., McGregor S., Min S., Morgenstern O., Sun Y. Human Influence on the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021, pp. 423-552. DOI: 10.1017/9781009157896.005

13. 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

14. Li Z., Liu T., Huang Y., Peng J., Ling Y. Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. *Earth's Future*, 2022, vol. 10, no. 8. pp. e2021EF002500. DOI: 10.1029/2021EF002500

15. Yazdandoost F., Moradian S., Izadi A., Aghakouchak A. Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 2021, vol. 250, pp. 105369. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105369

*Поступила 22.01.2025; одобрена после рецензирования 27.03.2025;  
принята в печать 10.04.2025.*

*Submitted 22.01.2025; approved after reviewing 27.03.2025;  
accepted for publication 10.04.2025.*