

Изменения характеристик осадков на территории России в XX-XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6

М.А. Алешина^{1), 2)}, В.А. Семенов^{1), 2)}*

¹⁾Институт географии РАН,
Россия, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

²⁾Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН,
Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 3

*Адрес для переписки: aleshina@igras.ru

Реферат. Проведено исследование изменений некоторых характеристик суточных осадков на территории России для зимнего и летнего сезонов в XX и XXI вв. с использованием климатических моделей проекта CMIP6. В современный период данные моделей сопоставляются с данными метеорологических станций и реанализа ERA5. Для зимы и лета проанализированы изменения среднесезонных сумм осадков, количества дней с осадками и повторяемости экстремальных осадков. Для современного периода 1991-2020 гг. по эмпирическим данным зимой на территории России получено значительное увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости дней с экстремальными осадками на побережье Дальнего Востока и в центральной части Европейской территории России (ЕТР). Также отмечено уменьшение повторяемости дней с осадками на большинстве метеорологических станций России на 4-6 дней /10 лет. Летом увеличение сумм осадков и повторяемости дней с осадками обнаружено в Западной Сибири и на побережье Охотского моря и Тихого океана. Уменьшение сумм и повторяемости осадков получены для юга ЕТР и юга Восточной Сибири.

Модели климата в среднем для ансамбля показывают рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России в зимний период, причем данные тенденции могут усилиться в ближайшие десятилетия. Летом, напротив, для юга ЕТР в целом отмечается слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками. Однако, сильные межмодельные различия, особенно в летний сезон, не позволяют сделать однозначных выводов по поводу изменений характеристик осадков на территории России в ближайшие 30 лет. К концу XXI столетия изменения становятся более выраженными. Так, например, на ЕТР и на севере Сибири может произойти заметное увеличение зимних сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков. Летом на ЕТР к концу XXI столетия возможно небольшое уменьшение сумм осадков и количества дней с осадками.

Ключевые слова. Изменения климата, режим осадков, экстремальные осадки, Россия, ERA5, CMIP6.

Changes in precipitation characteristics over Russia in XX-XXI centuries from CMIP6 models ensemble

M.A. Aleshina^{1), 2)}, V.A. Semenov^{1), 2)}*

¹⁾ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetnyi, 109017, Moscow, Russian Federation

²⁾ А.М. Обухов Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences,
3, Pyzhevsky pereulok, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: aleshina@igras.ru

Abstract. We studied the changes in daily precipitation characteristics over Russia for the winter and summer seasons in the XX and XXI centuries using CMIP6 climate models. The model data was compared with the meteorological stations and ERA5 reanalysis for the modern period. For winter and summer, the changes in the average seasonal precipitation amounts, the number of days with precipitation and the frequency of extreme precipitation are analyzed. According to empirical data, a significant increase in winter precipitation amounts and the frequency of extreme winter precipitation was detected on the Far East coast and in the central part of the European Territory of Russia (ETR) for the modern period 1991-2020. There was also a decrease in the frequency of precipitation days at most meteorological stations in Russia by 4-6 days/10 years. In summer, an increase in precipitation amounts and the frequency of precipitation days was found in Western Siberia, on the Sea of Okhotsk coast and in the Pacific Ocean. A decrease in the amount and frequency of precipitation was obtained for the south of the ETR and the south of Eastern Siberia.

In winter, ensemble of climate models shows an increase in the relative amounts of precipitation and the extreme precipitation frequency almost everywhere in Russia, and these trends may intensify for the next decades. In summer, on the contrary, for the south of the ETR there is a slight decrease in seasonal precipitation amounts and the number of days with precipitation. However, strong inter-model differences, especially in the summer season, do not allow us to draw unambiguous conclusions about changes in precipitation characteristics on the territory of Russia in the next 30 years. By the end of the XXI century, the changes are becoming more pronounced. For example, in the ETR and in the north of Siberia, there may be a noticeable increase in winter precipitation amounts and the frequency of extreme precipitation. In summer, by the end of the XXI century, a slight decrease in precipitation amounts and the number of days with precipitation is possible on the ETR.

Keywords. Climate change, precipitation regime, extreme precipitation, Russia, ERA5, CMIP6 models.

Введение

Согласно данным метеорологических станций, начиная с середины XX века над континентами наблюдается тенденция к увеличению общего количества годовой суммы осадков на 1-2%/100 лет (Eyring et al., 2021). Положительные тренды общего количества осадков были отмечены в основном для средних и высоких широт Северного полушария, в то время как в тропиках отмечалось уменьшение осадков. Однако, интенсивность осадков над сушей увеличивается практически повсеместно даже в тех регионах, где отмечены отрицательные или статистически не значимые тренды среднего количества осадков (Semenov, Bengtsson, 2002; Donat et al., 2016). Для территории России период последних четырех десятилетий в среднем характеризовался увеличением суммарного годового количества осадков на 2.2% за 10 лет. Более того, рост среднего количества осадков в последние 30 лет ускорился по сравнению со периодом наблюдений 1936-2010 гг. (Бардин и др., 2020).

Помимо средних характеристик осадков меняются также частота и интенсивность экстремальных осадков. Сильные осадки способны стать причиной серьезных природных бедствий, в т.ч. наводнений, с катастрофическими социальными и экономическими последствиями (Meredith et al., 2015; Frolova et al., 2017). Изменения характеристик экстремальности режима осадков имеют существенные региональные и сезонные особенности. На большей части территории России отмечено увеличение дней с экстремальными осадками зимой и весной (Zolotokrylin, Cherenkova, 2018). В (Chernokulsky et al., 2019) отмечается, что небольшое увеличение осадков в Северной Евразии обеспечивается за счет сильного роста конвективных осадков и компенсирующего уменьшения крупномасштабных осадков.

Одновременно с усилением интенсивности экстремальных осадков, в ряде регионов происходит увеличение продолжительности периодов без осадков (Золина, Булыгина, 2016). Это означает, что в некоторых регионах в условиях стабильности общего количества осадков может увеличиваться продолжительность периодов без осадков и засух, сменяющихся случаями экстремальных осадков. Также в последние годы на основе анализа эмпирических данных выдвинута гипотеза об уменьшении осадков при значительном повышении приземной температуры (Berg et al., 2009; Drobinski et al., 2016; Wang et al., 2018), которая находит подтверждения в том числе и для отдельных регионов России, особенно в летний сезон (Aleshina et al., 2021). Также при изучении экстремальных осадков важным вопросом является выбор типа функции распределения вероятностей для описания исследуемых явлений. Например, для станций Европейского сектора Арктики проведен анализ с использованием распределения Парето, который позволил выделить случаи с экстремально высокими осадками в регионе и провести анализ синоптических ситуаций, связанных с такими явлениями (Кислов и др, 2021; Kislov et al., 2022).

Таким образом, изучение особенностей режима осадков, в особенности экстремальных осадков, необходимо для составления более точных оценок будущих изменений климата, что может уменьшить риски негативных последствий таких явлений (Sillmann et al., 2017; Vogel et al., 2020).

Цель данной работы состоит в исследовании изменений основных характеристик среднего режима осадков, а также повторяемости экстремальных осадков на территории России в XX и XXI вв. с фокусом на современный период 1991-2020 гг. и период обозримого будущего, 2021-2050 гг. Для этого используются данные ансамбля климатических моделей проекта CMIP6, а также данные метеорологических станций и реанализа ERA5. Исследуются тенденции для зимнего и летнего сезонов.

Данные и методы

В работе использовались данные тридцати четырех моделей общей циркуляции атмосферы и океана, которые входят в международный проект сравнения моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) (Eyring et al., 2016). Всего в проекте участвует более 60 моделей (среди которых содержатся в том числе разные версии одних и тех же моделей), предоставляющие для анализа различные по полноте наборы данных. Выбор 34 моделей обоснован наличием данных по суточным значениям сумм осадков в открытых источниках данных для всех необходимых экспериментов. Данные были получены из источника Global Center for Environmental Data Analysis (<https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/CMIP6>). Шаг горизонтальной сетки в выбранных моделях варьируется от 0.7-1.5° (модели CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR и др.) до 2-2.8° (CanESM5, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR, MIROC-ES2L). Список использованных моделей и их пространственное разрешение приведены в табл. 1.

Использовались данные численных экспериментов для исторического периода (1900-2014 гг.) и для сценария антропогенного воздействия SSP585 (2015-2100 гг.) (Van Vuuren et al., 2014). Сценарий SSP585 описывает будущее развитие общества и экономики без сдерживания роста эмиссий парниковых газов с примерным удвоением эмиссий CO₂ к середине XXI в. и монотонным ростом антропогенного радиационного воздействия с современных значений 2.5 Вт/м² до 8.5 Вт/м² к концу века. Это самый агрессивный по интенсивности сценарий из всех, используемых в экспериментах с моделями CMIP6, дающий верхнюю оценку возможных изменений климата вследствие антропогенного воздействия.

Для сравнения с модельными результатами использовались данные наблюдений по суточным суммам атмосферных осадков на 524 метеорологических станциях климатического архива ВНИИГМИ МЦД за период 1966-2020 гг. Также были проанализированы данные реанализа ERA5 с горизонтальным разрешением 0.25×0.25° за период 1979-2021 гг. (Hersbach et al., 2018).

Для каждой модели получены значения относительных изменений сезонных сумм осадков (по сравнению со средними значениями в 1981-2010 гг.), общего числа дней за сезон с осадками (более 0.1 мм/день), а также повторяемости дней с экстремальными осадками. Экстремальными считались суточные суммы осадков, превышающие 95%-й процентиль функции распределения для периода 1981-2010 гг.

Таблица 1. Используемые в работе модели CMIP6 и их основные характеристики

Table 1. CMIP6 models used in the work and their main parameters

№ п/п	Модели	Страна	Шаг по долготе, °	Шаг по широте, °
1	ACCESS-CM2	Австралия	1.875	1.25
2	ACCESS-ESM1-5	Австралия	1.875	1.25
3	BCC-CSM2-MR	Китай	1.125	1.121
4	CAMS-CSM1-0	Китай	1.125	1.121
5	CanESM5	Канада	2.813	2.791
6	CESM2	США	1.25	0.942
7	CESM2-WACCM	США	1.25	0.942
8	CMCC-CM2-SR5	Италия	1.25	0.942
9	CMCC-ESM2	Италия	1.25	0.942
10	CNRM-CM6-1	Франция	1.406	1.401
11	CNRM-ESM2-1	Франция	1.406	1.401
12	EC-Earth3	Европа	0.703	0.702
13	EC-Earth3-CC	Европа	0.703	0.702
14	EC-Earth3-Veg	Европа	0.703	0.702
15	FGOALS-g3	Китай	2	2.025
16	GFDL-CM4	США	1.25	1
17	GFDL-ESM4	США	1.25	1
18	HadGEM3-GC31-LL	Великобритания	1.875	1.25
19	IITM-ESM	Индия	1.875	1.905
20	INM-CM4-8	Россия	2	1.5
21	INM-CM5-0	Россия	2	1.5
22	IPSL-CM6A-LR	Франция	2.5	1.268
23	KACE-1-0-G	Южная Корея	1.875	1.25
24	KIOST-ESM	Южная Корея	1.875	1.875
25	MIROC6	Япония	1.406	1.401
26	MIROC-ES2L	Япония	2.813	2.791
27	MPI-ESM1-2-HR	Германия	0.938	0.935
28	MPI-ESM1-2-LR	Германия	1.875	1.865
29	MRI-ESM2-0	Япония	1.125	1.121
30	NESM3	Китай	1.875	1.865
31	NorESM2-LM	Норвегия	2.5	1.895
32	NorESM2-MM	Норвегия	1.25	0.942
33	TaiESM1	Тайвань	1.25	0.942
34	UKESM1-0-LL	Великобритания	1.875	1.25

Для каждой модели был проведен расчет выбранных характеристик для всей территории России. Затем проведена процедура билинейной интерполяции полученных значений на единую сетку $1 \times 1^\circ$. Это необходимо для получения средних оценок по ансамблю климатических моделей. Аналогичный подход применялся, например, в работе (Kim et al., 2020) при изучении характеристик экстремальных температур и осадков. Средние по ансамблю моделей значения считаются более надежной оценкой современных и будущих изменений климата, связанных с внешним воздействием, поскольку такое осреднение может уменьшить случайно-распределенные ошибки индиви-

дуальных моделей (Gleckler et al., 2008; Pierce et al., 2009). Следует отметить, что такой подход, будучи самым распространенным, не всегда является оптимальным и более сложные статистические модели предлагаются для анализа мульти-модельных результатов (Елисеев, Семенов, 2016; Christiansen, 2020).

В качестве количественной характеристики климатических изменений используется коэффициент линейного тренда для 30-летних периодов: 1991-2020 и 2021-2050 гг. Проводились оценки статистической значимости трендов с использованием F-критерия Фишера с уровнем значимости 0.05. Для оценки межмодельного разброса тенденций характеристик осадков также приведены карты количества климатических моделей, показывающих тренды одного знака.

Результаты

Изменение характеристик осадков по данным метеорологических станций и реанализа ERA5

Результаты расчета коэффициентов линейного тренда сезонных сумм осадков относительно периода 1981-2010 гг., повторяемости дней с осадками выше 0.1 мм/день и повторяемости дней с экстремальными осадками (выше 95%-го процентиля в 1981-2010 гг.) по данным метеорологических станций и реанализа ERA5 за период 1991-2020 гг. представлены на рис. 1.

Для зимнего сезона по данным метеорологических станций отмечается увеличение на 15-20%/10 лет сезонных сумм осадков на побережье Дальнего Востока и в центральной части Европейской территории России (ЕТР). Также в этих регионах отмечается увеличение на 1-1.5 дней/сезон/10 лет повторяемости дней с экстремальными осадками (рис. 1в) По данным реанализа ERA5 увеличение суммарного количества осадков и повторяемости экстремальных осадков ярче выражено над акваториями морей Северного Ледовитого и Тихого океанов, над сушей, полученные тенденции преимущественно не являются статистически значимыми. Это может быть обусловлено сильной межгодовой изменчивостью среднесезонных осадков. Зимой в 1991-2020 гг. по данным метеорологических станций также выражено уменьшение повторяемости дней с осадками на 4-6 дней /10 лет (рис. 1б).

Летом увеличение сумм осадков и повторяемости дней с осадками получено для отдельных станций Западной Сибири, побережья Охотского моря и о. Сахалин. Также увеличение летних сумм осадков на 15-20%/10 лет и повторяемости дней с осадками на 3-5 дней/10 лет отмечено на Кольском полуострове, при этом частота экстремальных осадков в регионе значимо не изменилась. Отрицательные тенденции основных характеристик осадков получены на юге ЕТР и юге Восточной Сибири (рис. 1ж-и). Например, на юге ЕТР отмечено уменьшение сумм осадков на 15-20%/10 лет (на отдельных станциях до 30%/10 лет), в то же время происходит уменьшение количества дней с осадками на 3-6 дней/10 лет. В данном регионе также отмечается слабое уменьшение повторяемости дней с сильными осадками (0.4-0.8 дней/10 лет). Перечисленные особенности, полученные по данным метеорологических станций, достаточно хорошо соотносятся с данными реанализа ERA5.

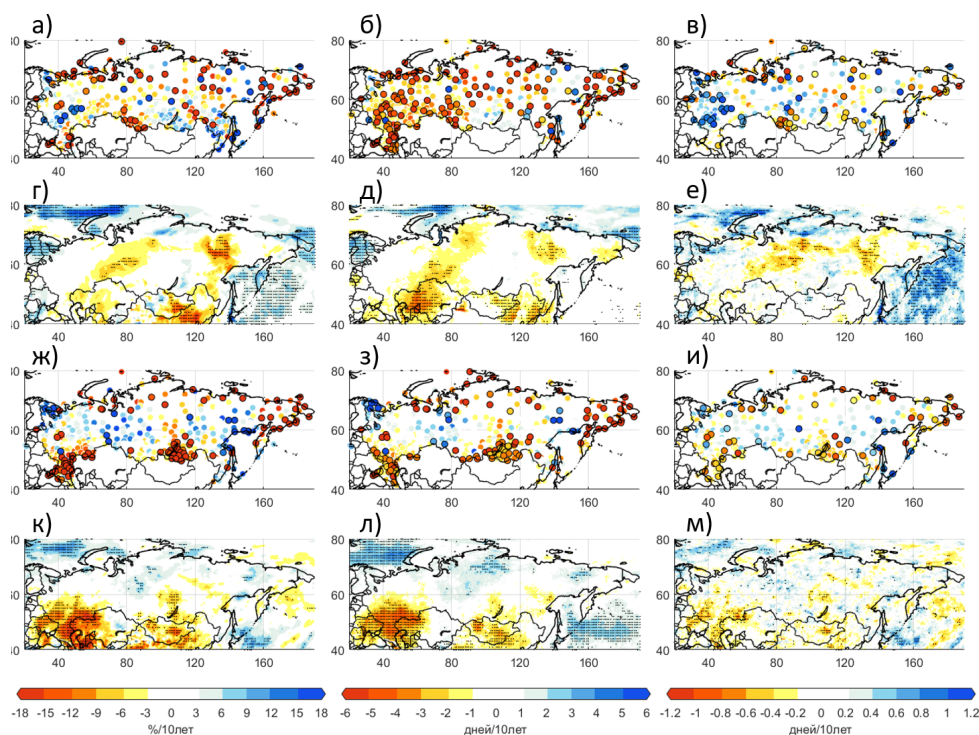


Рисунок 1. Коэффициенты линейных трендов сумм осадков (%/10 лет относительно периода 1981-2010 гг., а, г, ж, к), повторяемости дней с осадками (б, д, з, л), повторяемости дней с экстремальными осадками (в, е, и, м) по метеорологическим станциям (а-в зимой, ж-и летом) и реанализу ERA5 (г-е зимой, к-м летом) за период 1991-2020 гг.

Статистически значимые на уровне 0.05 тренды показаны жирными контурами для станций и штриховкой для реанализа

Figure 1. Linear trends of total precipitation (%/10 years relative to 1981-2010, а, г, ж, к), number of wet days (б, д, з, л), frequency of extreme precipitation (в, е, и, м) according to meteorological stations (а-в in winter, ж-и in summer) and ERA5 reanalysis (г-е in winter, к-м in summer) in 1991-2020

Statistically significant trends at the 0.05 level are shown by bold contours for stations and shading for reanalysis

Изменение характеристик осадков по данным климатических моделей проекта CMIP6

Тенденции изменений характеристик осадков для последних десятилетий и ближайших 30 лет по данным климатических моделей показаны на рис 2. Зимой для современного периода (1991-2020 гг.) климатические модели в среднем для ансамбля показывают практически повсеместный рост сезонных сумм осадков, что не соответствует эмпирическим данным. На большей части территории России зимние суммы осадков увеличиваются на 5-10%/10 лет, на Чукотском полуострове и в акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей до 15%/10 лет. Также практически на всей территории России получен относительно небольшой рост числа дней с экстремальными осад-

ками (0.2-0.4 дней/10 лет). Для периода 2021-2050 гг. отмеченные для современного периода тенденции усиливаются, средние оценки трендов сезонных сумм осадков составляют над сушей 10-15%/10 лет с максимальными скоростями роста на севере Восточной Сибири и в акваториях Восточно-Сибирского и Чукотского морей (до 20%/10 лет) (рис. 2г). Также может усилиться рост повторяемости дней с экстремальными осадками, количественная оценка среднемоделных трендов составляет от 0.4-0.6 дней/10 лет на ЕТР до 0.6-0.8 дней/10 лет в горах северо-восточной Сибири (рис. 2е). Для повторяемости дней с осадками выше 0.1 мм/день значимых трендов над сушей не отмечено ни для современного периода, ни для ближайших 30 лет (рис. 2б,д,з).

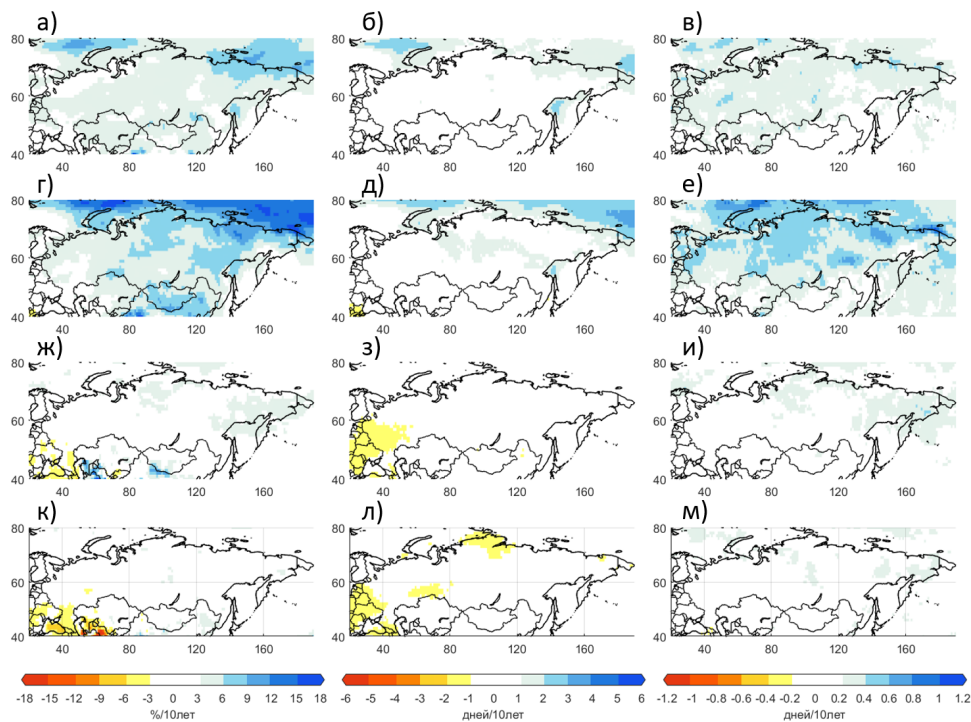


Рисунок 2. Средние по моделям СМIP6 коэффициенты линейных трендов сумм осадков (%/10 лет относительно периода 1981-2010 гг., а, г, ж, к), повторяемости дней с осадками (дней/10 лет, б, д, з, л), повторяемости дней с экстремальными осадками (дней/10 лет, в, е, и, м) за период 1991-2020 гг. (а-в зимой, ж-и летом) и период 2021-2050 гг. (г-е зимой, к-м летом)

Figure 2. Linear trends of total precipitation (%/10 years relative to 1981-2010, а, г, ж, к), number of wet days (б, д, з, л), frequency of extreme precipitation (в, е, и, м) according to mean СMIP6 models data in 1991-2020 (а-в in winter, ж-и in summer) and 2021-2050 (г-е in winter, к-м in summer)

Летом по данным моделей в 1991-2020 гг. лишь на ЕТР в среднем отмечается небольшое снижение количества дней с осадками на 1-2 дня/10 лет (рис. 2з). Для 2021-2050 гг. на юге ЕТР в среднем по моделям получено уменьшение летних сумм осадков до 10%/10 лет (рис. 2к). Для остальных регионов выбранные характеристики осадков в целом практически не меняются. Таким

образом, осредненные по климатическим моделям тренды слабо воспроизведут полученное по эмпирическим данным уменьшение осадков на ЕТР.

Процедура осреднения данных климатических моделей приводит к сглаживанию результатов. Для эмпирических данных неустойчивые значения трендов связаны преимущественно с сильной межгодовой изменчивостью характеристик осадков. Например, для Крымского полуострова ранее было показано, что межгодовые вариации сезонных сумм осадков могут составлять $\pm 50\%$ от средноклиматических значений (Семенов, Алешина, 2022). Для результатов большого ансамбля климатических моделей целесообразно оценивать межмодельный разброс полученных значений. На рис. 3 представлены оценки количества моделей, для которых были получены положительные значения трендов выбранных характеристик. Для зимнего сезона увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости сильных осадков отмечено в среднем для 25-30 моделей (из 34). Для количества дней с осадками этот показатель зимой ниже (15-20) и составляет примерно половину всех использованных моделей (рис. 3д). Таким образом, при осреднении трендов повторяемости дней с осадками и были получены значения близкие к нулю (рис. 2д).

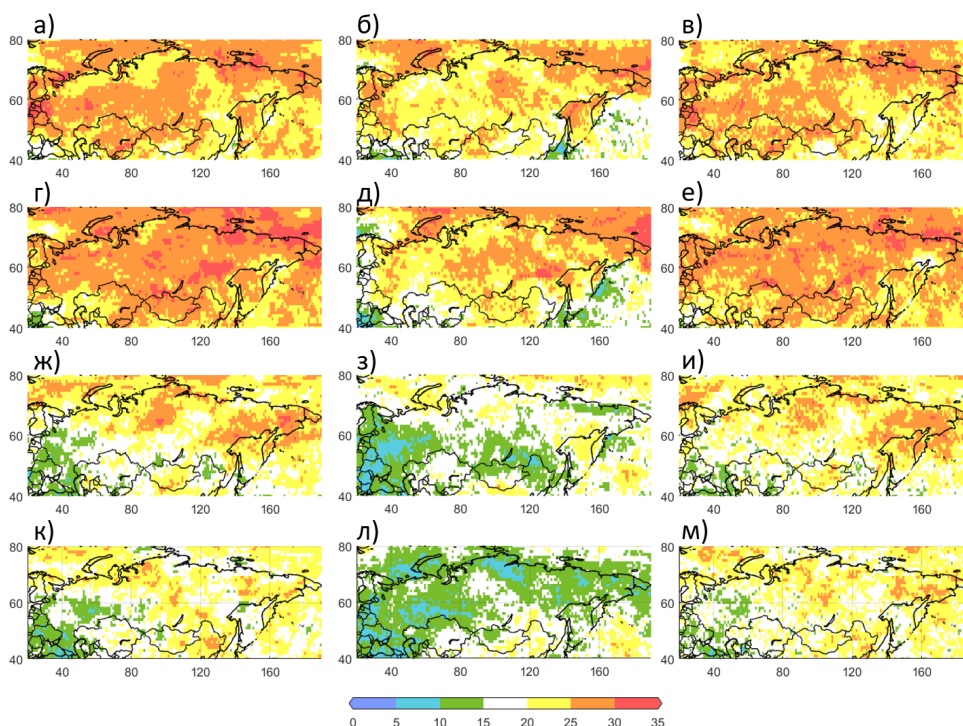


Рисунок 3. Количество моделей СМIP6 с положительными значениями коэффициентов линейных трендов сумм осадков (относительно периода 1981-2010 гг., а, г, ж, к), повторяемости дней с осадками (б, д, з, л), повторяемости дней с экстремальными осадками (в, е, и, м) за период 1991-2020 гг. (а-в зимой, ж-и летом) и период 2021-2050 гг. (г-е зимой, к-м летом)

Figure 3. Number of CMIP6 models with positive trends of total precipitation (%/10 years relative to 1981-2010, а, г, ж, к), number of wet days (б, д, з, л), frequency of extreme precipitation (в, е, и, м) in 1991-2020 (а-в in winter, ж-и in summer) and 2021-2050 (г-е in winter, к-м in summer)

Для летнего сезона больше половины моделей показывают отрицательные тренды относительных сумм осадков и количества дней с осадками выше 0.1 мм (на ЕТР количество моделей с положительными трендами составляют менее 10), поэтому для этого региона и было получено в среднем слабое уменьшение этой характеристики (рис. 2з). Положительные тренды сумм летних осадков в 1991-2020 гг. более чем в половине моделей отмечаются в Красноярском крае и в республике Якутия. Однако, для периода 2021-2050 гг. количество моделей с положительными трендами в этих регионах также уменьшается.

Представленные выше карты изменений характеристик осадков не дают представления о величине межмодельного разброса результатов. В качестве примера для двух регионов также приводятся временные ряды характеристик осадков по данным отдельных моделей, средних для ансамбля моделей за период 1900-2100 гг. в сопоставлении с данными реанализа ERA5. Это сделано для регионов центра ЕТР (20-35° в.д., 50-60° с.ш.) и севера Красноярского края (90-110° в.д., 65-73° с.ш.) (рис. 4). Межгодовая изменчивость средних для ансамбля характеристик существенно ниже, чем по данным реанализа, поскольку при внутриансамблевом осреднении отфильтровываются случайные межгодовые флуктуации и остаются изменения, связанные с внешним воздействием на климат. Вместе с тем результаты индивидуальных моделей демонстрируют сравнимый с наблюдаемым диапазон межгодовой изменчивости осадков. При этом модели в целом недооценивают повторяемость дней с осадками летом на ЕТР и немного завышают аналогичные значения летом на севере Красноярского края (рис. 4д,л). Следует также отметить, что как по данным реанализа, так и по климатическим моделям, в современный период все изменения выбранных характеристик осадков не выходят за пределы межгодовой изменчивости, что и объясняет низкие значения трендов на рис. 1, 2.

К концу XXI в. зимой по моделям отмечается увеличение относительных сумм осадков на ЕТР на 30-40% и на севере Красноярского края более чем на 60%, которое может сопровождаться увеличением повторяемости дней с экстремальными осадками (до 6-10 дней/сезон). Летом к концу столетия отмечается лишь небольшое уменьшение относительных сумм осадков на ЕТР (на 10-20%) и увеличение в Красноярском крае (на 10-20%). Также по среднемодельным оценкам к концу XXI в. на ЕТР повторяемость дней с осадками может составить 40 дней/сезон вместо 60 дней/сезон (рис. 4д).

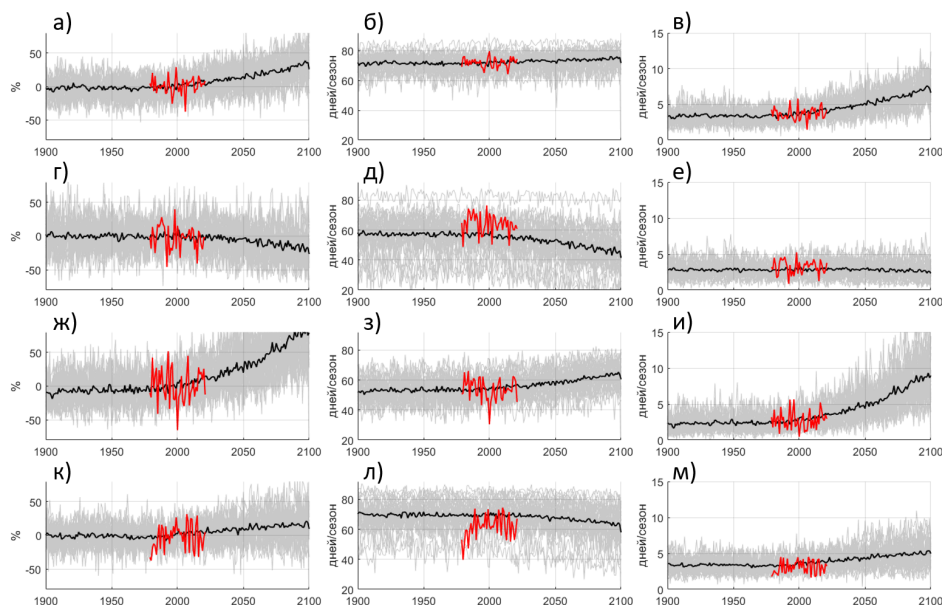


Рисунок 4. а, г, ж, к – относительные изменения среднесезонных сумм осадков (в % относительно средних значений для периода 1981-2010 гг.); б, д, з, л – количество дней с осадками выше 0.1 мм (дней/сезон); в, е, и, м – количество дней с экстремальными осадками (дней/сезон) в Центральной России (а-в зима, г-е лето) и на севере Красноярского края (ж-и зима, л-м лето) по данным моделей СМIP6 (серые кривые, черной кривой показаны средние по моделям значения) и реанализа ERA5 (красная кривая)

Figure 4. а, г, ж, к – total seasonal precipitation (in % relative to the average values in 1981-2010); б, д, з, л – the number of wet days (above 0.1 mm) (days/season); в, е, и, м – frequency of extreme precipitation(days/season) in Central Russia (а-в in winter, г-е in summer) and Krasnoyarsk region (ж-и winter, л-м summer) according to CMIP6 models (gray lines, the black lines show the average values of the models) and ERA5 reanalysis (red line)

Заключение

В работе представлены оценки изменений характеристик режима осадков в XX-XXI в. на территории России по данным ансамбля моделей климата последнего поколения СМIP6 для сценария антропогенного воздействия SSP585. Анализировались изменения среднесезонных для зимы и лета осадков, повторяемости дней с осадками и количества дней с экстремальными осадками. Для современного периода данные моделей сравниваются с данными метеорологических станций и реанализа ERA5.

По эмпирическим данным зимой на территории России в 1991-2020 гг. отмечается увеличение сезонных сумм осадков и повторяемости дней с экстремальными осадками на побережье Дальнего Востока и в центральной части Европейской территории России. Также выражено уменьшение повторяемости дней с осадками на 4-6 дней /10 лет. Летом увеличение сумм осадков и повторяемости дней с осадками получено для отдельных станций

Западной Сибири, побережья Охотского моря и о. Сахалин. Уменьшение сумм и повторяемости получены для юга ЕТР и юга Восточной Сибири.

Модели климата в среднем для ансамбля зимой показывают рост относительных сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков на большей части территории России, причем данные тенденции могут усилиться в ближайшие десятилетия. Летом, напротив, для юга ЕТР в среднем показано слабое уменьшение сезонных сумм осадков и количества дней с осадками. Однако, при подсчете количества моделей с однонаправленными тенденциями было показано, что противоположные результаты получены зимой примерно для трети климатических моделей, а летом – до половины. Таким образом, сильные межмодельные различия не позволяют сделать однозначных выводов по поводу изменений характеристик осадков на территории России в ближайшие 30 лет. Однако, к концу XXI столетия изменения становятся более выраженными. Так, например, на ЕТР и на севере Сибири может произойти заметное увеличение зимних сумм осадков и повторяемости экстремальных осадков. Летом на ЕТР к концу XXI столетия вероятно произойдет небольшое уменьшение сумм осадков и количества дней с осадками.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 19-17-00242, анализ внутриансамблевой модельной неопределённости выполнен в рамках Соглашения с Минобрнауки РФ № 075-15-2021-577. Региональные оценки проведены в рамках Госзадания FMGE-2019-0009.

Список литературы

Бардин, М.Ю., Ранькова, Э.Я., Платова, Т.В., Самохина, О.Ф., Корнева, И.А. (2020) Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга, *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 29-45.

Елисеев, А.В., Семенов, В.А. (2016) Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата, *Доклады Академии наук*, Федеральное государственное унитарное предприятие Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр Наука, т. 471, № 2, с. 214-218.

Золина, О.Г., Булыгина, О.Н. (2016) Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 1, с. 84-103.

Кислов, А. В., Антипина, У. И., Корнева, И. А. (2021) Экстремальные осадки Европейского сектора Арктики в летний период: статистика и синоптические модели, *Метеорология и гидрология*, №. 7, с. 20-34.

Семенов, В.А., Алешина, М.А. (2022) Сценарные прогнозы изменений температурного и гидрологического режима Крыма в XXI веке по данным мо-

делей климата CMIP6, *Водные ресурсы*, т. 49, № 4, с. 506-516.

Aleshina, M.A., Semenov, V.A., Chernokulsky, A.V. (2021) A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data, *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 10, p. 105004.

Berg, P., Haerter, J.O., Thejll, P., Piani, C., Hagemann, S., Christensen, J.H. (2009) Seasonal characteristics of the relationship between daily precipitation intensity and surface temperature, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 114, no. D18.

Chernokulsky, A., Kozlov, F., Zolina, O., Bulygina, O., Mokhov, I.I., Semenov, V.A. (2019) Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades, *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 4, p. 045001, doi:10.1088/1748-9326/aafb82.

Christiansen, B. (2020) Understanding the Distribution of Multimodel Ensembles, *Journal of Climate*, vol. 33, no. 21, pp. 9447-9465.

Donat, M.G., Lowry, A.L., Alexander, L.V., O’Gorman, P.A., Maher, N. (2016) More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions, *Nature Climate Change*, vol. 6, no. 5, pp. 508-513.

Drobinski, P., Alonzo, B., Bastin, S., Silva, N.D., Muller, C. (2016) Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region: What explains the hook shape? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 121, no. 7, pp. 3100-3119.

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

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. (2021) 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//Climate change*, pp. 1-202.

Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Magrickiy, D.V., Bologov, M.B., Kopylov, V.N., Hall, J., Belyakova, P.A. (2017) Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment, *Natural Hazards*, vol. 88, no. 1, с. 103-131.

Gleckler, P.J., Taylor, K.E., Doutriaux, C. (2008) Performance metrics for climate models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, no. D6, doi:10.1029/2007jd008972.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Thépaut, J.N. (2018) ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, vol. 10.

Kim, Y.H., Min, S.K., Zhang, X., Sillmann, J., Sandstad, M. (2020) Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices, *Weather and Climate Extremes*, vol. 29, p. 100269.

Kislov, A., Matveeva, T., Antipina, U. (2022) Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season, *Atmosphere*, vol. 13, no. 7, pp 1116.

Meredith, E.P., Semenov, V.A., Maraun, D., Park, W., Chernokulsky, A.V. (2015) Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme, *Nature Geoscience*, vol. 8, no. 8, p. 615.

Min, S.K., Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C. (2011) Human contribution to more-intense precipitation extremes, *Nature*, vol. 470, no. 7334, p. 378-381.

Pierce, D.W., Barnett, T.P., Santer, B.D., Gleckler, P.J. (2009) Selecting global climate models for regional climate change studies, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no. 21, pp. 8441-8446, doi: 10.1073/pnas.0900094106.

Semenov, V., Bengtsson, L. (2002) Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM, *Climate Dynamics*, vol. 19, no. 2, pp. 123-140.

Sillmann, J., Thorarinsdottir, T., Keenlyside, N., Schaller, N., Alexander, L.V., Hegerl, G., Zwiers, F.W. (2017) Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities, *Weather and climate extremes*, vol. 18, pp. 65-74.

Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., O'Neill, B.C., Ebi, K.L., Riahi, K., Carter, T.R., Winkler, H. (2014) A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture, *Climatic Change*, vol. 122, no. 3, pp. 373-386, available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>.

Vogel, M.M., Hauser, M., Seneviratne, S.I. (2020) Projected changes in hot, dry and wet extreme events' clusters in CMIP6 multi-model ensemble, *Environmental Research Letters* vol. 15, no. 9, p. 094021.

Wang, H., Sun, F., Liu, W. (2018) The dependence of daily and hourly precipitation extremes on temperature and atmospheric humidity over China, *Journal of Climate*, vol. 31, no. 21, pp. 8931-8944.

Zolotokrylin, A., Cherenkova, E. (2017) Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 10, no. 4, pp. 69-82, doi: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-69-82.

References

Bardin, M.Y., Rankova, E.Y., Platova, T.V., Samokhina, O.F., Korneva, I.A. (2020) Sovremennye izmeneniya prizemnogo klimata po rezul'tatam regulyarnogo monitoringa [Modern Surface Climate Change as Inferred from Routine Climate Monitoring Data], *Meteorologiya i gidrologiya*, vol. 45, no. 3, pp. 317-329.

Eliseev, A.V., Semenov, V.A. (2016) Izmeneniya klimata Arktiki v XXI veke: ansamblevye model'nye ocenki s uchetom realisticnosti vosproizvedeniya sovremennogo klimata [Arctic climate changes in the 21st century: ensemble model estimates according for realism in present-day climate simulation], *Doklady Akademii nauk*, vol. 471, no. 1, pp. 1183-1187.

Zolina, O.G., Bulygina, O.N. (2016) Sovremennaya klimaticheskaya izmenchivost karakteristik ekstremalnykh osadkov v Rossii [Current climatic variability of extreme precipitation in Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 1, pp. 84-103.

Kislov A.V., Antipina U.I., Korneva I. (2021) Ekstremalnyye osadki Evropeyskogo sektora Arktiki v letniy period: statistika i sinopticheskiye modeli [Extreme Precipitation in the European Arctic in Summer: Statistics and Synoptic Models]. *Meteorologiya i gidrologiya*, vol. 46, no. 7, pp. 434-443.

Semenov, V.A., Aleshina, M.A. (2022) Scenarnye prognozy izmenenij temperaturnogo i gidrologicheskogo rezhima Kryma v XXI veke po dannym modelej klimata CMIP6 [Scenario forecasts of changes in the temperature and hydrological regime of the Crimea in the XXI century according to climate models CMIP6], *Vodnye resursy*, vol. 4, no. 4, pp. 506-516.

Aleshina, M.A., Semenov, V.A., Chernokulsky, A.V. (2021) A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data, *Environmental Research Letters*, vol. 16, no. 10, p. 105004.

Berg, P., Haerter, J.O., Thejll, P., Piani, C., Hagemann, S., Christensen, J.H. (2009) Seasonal characteristics of the relationship between daily precipitation intensity and surface temperature, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 114, no. D18.

Chernokulsky, A., Kozlov, F., Zolina, O., Bulygina, O., Mokhov, I.I., Semenov, V.A. (2019) Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades, *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 4, p. 045001, doi:10.1088/1748-9326/aafb82.

Christiansen, B. (2020) Understanding the Distribution of Multimodel Ensembles, *Journal of Climate*, vol. 33, no. 21, pp. 9447-9465.

Donat, M.G., Lowry, A.L., Alexander, L.V., O’Gorman, P.A., Maher, N. (2016) More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions, *Nature Climate Change*, vol. 6, no. 5, pp. 508-513.

Drobinski, P., Alonzo, B., Bastin, S., Silva, N.D., Muller, C. (2016) Scaling of precipitation extremes with temperature in the French Mediterranean region:

What explains the hook shape? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 121, no. 7, pp. 3100-3119.

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

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. (2021) 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//Climate change*, pp. 1-202.

Frolova, N.L., Kireeva, M.B., Magrickiy, D.V., Bologov, M.B., Kopylov, V.N., Hall, J., Belyakova, P.A. (2017) Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment, *Natural Hazards*, vol. 88, no. 1, c. 103-131.

Gleckler, P.J., Taylor, K.E., Doutriaux, C. (2008) Performance metrics for climate models, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 113, no. D6, doi:10.1029/2007jd008972.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Thépaut, J.N. (2018) ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present, *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*, vol. 10.

Kim, Y.H., Min, S.K., Zhang, X., Sillmann, J., Sandstad, M. (2020) Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices, *Weather and Climate Extremes*, vol. 29, p. 100269.

Kislov, A., Matveeva, T., Antipina, U. (2022) Precipitation Extremes and Their Synoptic Models in the Northwest European Sector of the Arctic during the Cold Season, *Atmosphere*, vol. 13, no. 7, p. 1116.

Meredith, E.P., Semenov, V.A., Maraun, D., Park, W., Chernokulsky, A.V. (2015) Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme, *Nature Geoscience*, vol. 8, no. 8, p. 615.

Min, S.K., Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C. (2011) Human contribution to more-intense precipitation extremes, *Nature*, vol. 470, no. 7334, p. 378-381.

Pierce, D.W., Barnett, T.P., Santer, B.D., Gleckler, P.J. (2009) Selecting global climate models for regional climate change studies, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no. 21, pp. 8441-8446, doi: 10.1073/pnas.0900094106.

Semenov, V., Bengtsson, L. (2002) Secular trends in daily precipitation characteristics: Greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM, *Climate Dynamics*, vol. 19, no. 2, pp. 123-140.

Sillmann, J., Thorarinsdottir, T., Keenlyside, N., Schaller, N., Alexander, L.V., Hegerl, G., Zwiers, F.W. (2017) Understanding, modeling and predicting weather and climate extremes: Challenges and opportunities, *Weather and climate extremes*, vol. 18, pp. 65-74.

Van Vuuren, D.P., Kriegler, E., O'Neill, B.C., Ebi, K.L., Riahi, K., Carter, T.R., Winkler, H. (2014) A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture, *Climatic Change*, vol. 122, no. 3, pp. 373-386, available at: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>.

Vogel, M.M., Hauser, M., Seneviratne, S.I. (2020) Projected changes in hot, dry and wet extreme events' clusters in CMIP6 multi-model ensemble, *Environmental Research Letters*, vol. 15, no. 9, p. 094021.

Wang, H., Sun, F., Liu, W. (2018) The dependence of daily and hourly precipitation extremes on temperature and atmospheric humidity over China, *Journal of Climate*, vol. 31, no. 21, pp. 8931-8944.

Zolotokrylin, A., Cherenkova, E. (2017) Seasonal changes in precipitation extremes in Russia for the last several decades and their impact on vital activities of the human population, *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 10, no. 4, pp. 69-82, doi: 10.24057/2071-9388-2017-10-4-69-82.

Статья поступила в редакцию (Received): 10.10.2022.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.10.2022.

Принята к публикации (Accepted): 20.10.2022.

Для цитирования / For citation:

Алешина, М.А., Семенов, В.А. (2022) Изменения характеристик осадков на территории России в XX-XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 8, № 4, с. 424-440, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-424-440.

Aleshina, M.A., Semenov, V.A. (2022) Changes in precipitation characteristics over Russia in XX-XXI centuries from CMIP6 models ensemble, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 8, no. 4, pp. 424-440, doi:10.21513/2410-8758-2022-4-424-440.