

ПРОБЛЕМЫ ВОДОБЕСПЕЧЕННОСТИ  
АРИДНЫХ РЕГИОНОВ

УДК 551.582

СЦЕНАРНЫЕ ПРОГНОЗЫ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО  
И ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА КРЫМА В XXI ВЕКЕ  
ПО ДАННЫМ МОДЕЛЕЙ КЛИМАТА CMIP6<sup>1</sup>

© 2022 г. В. А. Семенов<sup>a, b, \*</sup>, М. А. Алешина<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017 Россия

<sup>b</sup>Институт географии РАН, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: vasetmenov@ifaran.ru

Поступила в редакцию 23.12.2021 г.

После доработки 15.02.2022 г.

Принята к публикации 21.02.2022 г.

Представлены сценарные проекции изменений климата в XXI в. в Крыму по данным ансамбля моделей климата последнего поколения CMIP6 для агрессивного SSP585 и умеренного SSP245 сценариев антропогенного воздействия. Показаны изменения среднесезонных для зимы и лета значений температуры и осадков, количества дней с экстремальными аномалиями температуры и осадков, интенсивности осадков и вклада сильных осадков в сезонную сумму. Для современного периода данные моделей сравниваются с данными реанализа ERA5 и интерполированными сеточными данными наблюдений CRUTS4.05. К концу XXI в. в среднем по ансамблю моделей ожидается повышение летней температуры на ~6 и на 2.5°C для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. Для зимы рост температуры значительно меньше и составляет 3.5 и 1.5°C. Летом число дней с экстремально высокой температурой (95% перцентиль функции распределения для 1981–2010 гг.) уже в середине XXI в. вырастет в 5–6 раз, а к концу века даже для умеренного сценария составит ~40 дней. Для сезонных осадков характерна сильная межгодовая изменчивость, на фоне которой зимой в моделях отмечается статистически незначимый рост, а летом к концу XXI в. ожидается существенное уменьшение осадков на ~15 и 40% для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. При этом летом не прогнозируется статистически значимого снижения интенсивности и экстремальности осадков. Зимой на фоне некоторого роста сезонной суммы осадков существенно растет доля экстремальных осадков в общей сумме осадков – от ~25 до 35%. Важно отметить, что в ближайшие два десятилетия прогнозируемые изменения практически не зависят от анализируемых сценариев антропогенного воздействия. Уменьшение осадков при росте температуры указывает на важную роль динамики атмосферы в будущих изменениях характеристик осадков в исследуемом регионе.

**Ключевые слова:** климат Крыма, изменения климата, сценарии изменения климата, модели CMIP6, экстремальные погодные события.

**DOI:** 10.31857/S0321059622040174

ВВЕДЕНИЕ

Рост приземной температуры на территории России в последние десятилетия происходит более чем в два раза быстрее, чем в среднем по планете [5]. Такие изменения объясняются арктическим усилением глобального потепления [30] и воспроизводятся моделями климата. В целом, современные тенденции изменения климата в России характеризуются более быстрыми темпами

потепления зимой в высоких широтах на Европейской территории, а в переходные сезоны – в Азиатской части страны, а также увеличением среднегодового количества осадков в северных и уменьшением в южных регионах [3, 5]. При этом отмечается рост опасных погодных явлений, связанных с крупномасштабными и региональными изменениями температурно-влажностного режима и атмосферной циркуляции [10].

Изменения климата в регионе Черного моря, в том числе в Крыму, характеризуются важными особенностями ввиду близости моря – крупномасштабного источника влаги и температурных контрастов, наличием прибрежных горных массивов, интенсивной циклонической активностью. На формирование региональных измене-

<sup>1</sup> Статистическая обработка модельных данных выполнена в рамках Госзадания Института географии РАН (AAAA-A19-119022190173-2, FMGE-2019-0009). Исследование будущих изменений экстремальных осадков выполнено при поддержке РФ (проект 19-17-00242). Валидация результатов моделей для современного периода выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-55-14003).

ний климата и его аномалий оказывают влияние глобальное потепление, естественные климатические колебания в Северной Атлантике, явление Эль Ниньо/Южное Колебание, а также рост температуры поверхности Черного моря [11–13, 24, 29].

Температурный режим в черноморском регионе в последние десятилетия в целом менялся в сторону роста средней температуры, частоты и интенсивности ее экстремально высоких значений [8]. В то же время тенденции изменения осадков были в целом слабо отрицательные и статистически не значимые [2]. В понимании механизмов формирования экстремальных осадков в черноморском регионе, связи экстремальных осадков с аномалиями циркуляции атмосферы и глобальным потеплением существуют значительные пробелы. Данные наблюдений указывают на отсутствие статистически значимого роста интенсивности осадков в современный период [2, 18, 33]. Эксперименты с моделью климата показали, что в то время как фактор роста температуры поверхности Черного моря приводит к увеличению экстремальности осадков на побережье, фактор глобального потепления в виде увеличения температуры глобального океана в последние десятилетия снижает интенсивность экстремальных осадков в регионе из-за подавления конвекции и усиления дивергенции влаги [1]. Тенденция к снижению экстремальности летних осадков с ростом температуры в целом характерна для южных регионов России [14].

В то же время в начале XXI в. на черноморском побережье произошел ряд сильных событий с экстремальными осадками, в том числе беспрецедентных за историю наблюдений и связанных с региональными изменениями климата [27]. Современные тенденции изменения крупномасштабной циркуляции атмосферы, рост влагоемкости с потеплением также могут способствовать росту экстремальных осадков [9, 31].

Ввиду значительной плотности населения и инфраструктуры в черноморском регионе экстремальные погодные явления, как правило, сопровождаются значительными негативными последствиями, а изменения климата оказывают существенное влияние на ведение сельского хозяйства и функционирование туристической отрасли. Малая плотность и водность речной сети Крыма с преимущественно паводочным режимом стока, перекрытие поступления вод Днепра в Северо-Крымский канал в 2014 г., современные тенденции к усилению засушливости климата Крыма делают проблему водной обеспеченности Крыма одной из наиболее важных для устойчивого развития региона.

Для решения этой проблемы, выработки научно-обоснованных решений в области обеспечения водной и водно-экологической безопасности

критически важны оценки будущих изменений климата в ближайшие десятилетия. Такие оценки можно получить с использованием ансамбля глобальных моделей климата с заданными проекциями антропогенного воздействия в течение XXI в. (эмиссия парниковых газов и аэрозолей). В последние годы стали доступны данные ансамблей моделей климата последнего поколения CMIP6, на основе которого делаются оценки изменений Межправительственной группой экспертов будущих изменений климата [25]. Полученные ранее оценки возможных изменений климата в черноморском регионе показали значительный рост среднегодовой температуры и отсутствие значимых изменений осадков [7, 15].

В настоящей работе максимальное количество данных моделей CMIP6 (ограниченного пространственным разрешением) было использовано для расчета возможных изменений режима температуры и осадков в Крыму на протяжении XXI в. для двух возможных сценариев антропогенного воздействия на климат: агрессивного и умеренного. Это позволяет оценить неопределенность климатического прогноза, связанную с модельными особенностями, выбором сценария воздействия и внутренней изменчивостью [20]. Для последних четырех десятилетий и XX в. в целом данные моделей сравниваются с эмпирическими данными.

## ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В работе анализируются данные девятнадцати моделей общей циркуляции атмосферы и океана, которые входят в международный проект сравнения моделей климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) [19]. В проекте участвует более 60 моделей (среди которых содержатся в том числе разные версии одних и тех же модельных систем), предоставляющие для анализа различные по полноте наборы данных. Не все модели имеют достаточно детализированное пространственное разрешение, при котором Крым с характерной протяженностью  $\sim 2.5^\circ$  по долготе и  $1.5^\circ$  по широте представлен на модельной сетке как отдельный полуостров. Поэтому в качестве критерия выбора моделей для анализа выступали горизонтальное разрешение моделей (шаг сетки  $\leq 2.5^\circ$  по широте и  $1.5^\circ$  по долготе), а также наличие в открытых базах данных моделей в суточном разрешении для температуры и сумм осадков. Шаг сетки в выбранных моделях варьирует от  $0.5^\circ$ – $1^\circ$  (модели CNRM-CM6-1-HR, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR) до  $2^\circ$ – $2.5^\circ$  (INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR). Использовались данные численных экспериментов с двумя сценариями антропогенного воздействия – SSP585 и SSP245 [32]. Сценарий SSP585 описывает будущее развитие общества и экономики без сдерживания роста

**Таблица 1.** Модели CMIP6, использовавшиеся для анализа, их горизонтальное разрешение и критерии экстремальных значений температуры и осадков для Крыма

Модели	Горизонтальное разрешение		95%-й процентиль осадков, мм/день		5%-й процентиль температуры, °С		95%-й процентиль температуры, °С	
	шаг по долготе, °	шаг по широте, °	зима	лето	зима	лето	зима	лето
ACCESS-CM2	1.875	1.25	8.46	10.71	-12.39	16.47	6.69	28.51
ACCESS-ESM1-5	1.875	1.25	8.42	12.60	-9.65	19.92	7.81	31.56
BCC-CSM2-MR	1.125	1.121	8.37	7.53	-7.00	16.36	9.66	29.33
CAMS-CSM1-0	1.125	1.121	8.62	7.72	-10.17	15.95	7.88	25.97
CESM2-WACCM	1.25	0.942	8.70	5.89	-3.63	18.89	12.03	29.34
CMCC-CM2-SR5	1.25	0.942	8.92	7.62	-1.97	20.19	10.87	31.20
CNRM-CM6-1-HR	0.500	0.499	10.11	15.00	-9.75	16.93	9.53	27.46
EC-Earth3	0.703	0.702	7.67	7.71	-6.22	17.58	9.04	28.53
GFDL-ESM4	1.25	1	8.55	11.28	-6.95	17.91	9.16	28.38
HadGEM3-GC31-LL	1.875	1.25	9.42	9.50	-2.47	17.01	10.64	26.07
INM-CM5-0	2	1.5	10.30	3.60	-1.34	17.75	11.32	28.81
IPSL-CM6A-LR	2.5	1.268	11.55	15.48	-2.84	17.96	11.20	28.48
KACE-1-0-G	1.875	1.25	9.82	6.37	-5.28	18.24	10.47	27.55
MIROC6	1.406	1.401	9.47	6.48	-3.09	21.78	11.82	33.53
MPI-ESM1-2-HR	0.938	0.935	11.33	11.21	-7.81	18.09	10.16	30.89
MRI-ESM2-0	1.125	1.121	9.94	10.31	-4.94	17.55	10.56	25.92
NorESM2-MM	1.25	0.942	8.28	6.92	-3.74	18.34	11.01	29.32
TaiESM1	1.25	0.942	9.82	7.22	-3.80	20.93	10.76	31.43
UKESM1-0-LL	1.875	1.25	8.12	6.99	-3.93	16.82	10.39	26.18
ERA5	0.25	0.25	7.91	11.77	-5.72	17.34	8.82	27.11

эмиссий парниковых газов с почти удвоением эмиссий CO<sub>2</sub> к середине XXI в. и монотонным ростом антропогенного радиационного воздействия с современных значений 2.5 Вт/м<sup>2</sup> до 8.5 Вт/м<sup>2</sup> к концу века. Сценарий SSP245 подразумевает удерживание эмиссии примерно на современном уровне до середины века и последующее их снижение, в результате чего внешнее радиационное воздействие достигает максимума в 4.5 Вт/м<sup>2</sup> к 2080-м гг.

В каждой модели выбирались узлы сетки, которые попадают на территорию Крымского п-ова, для которых проводился осредненный для региона расчет основных температурных характеристик и показателей режима осадков. Помимо среднесезонных величин характеристик температурного режима, для каждой модели были получены повторяемости (числа дней в сезон) экстремально низких и экстремально высоких значений температуры. В качестве пороговых значений экстремально низкой температуры использовался 5%-й процентиль, а для экстремально высоких — 95%-й процентиль функции распределения вероятностей для периода 1981–2010 гг. Экстремаль-

ными осадками считались суточные суммы осадков, превышающие 95%-й процентиль функции распределения для периода 1981–2010 гг. Анализировались изменения повторяемости экстремальных значений температуры и осадков для каждого сезона в отдельности для периода 1900–2100 гг. Также анализировалась интенсивность осадков — средние за сезон суммы осадков за дни с осадками, превышающими 0.1 мм/день, и вклад экстремальных осадков в общую сумму осадков. В работе представлены результаты расчетов для зимы и лета. Список использованных моделей, их пространственное разрешение, значения для 5%-х и 95%-х перцентилей функций распределения температуры и осадков для современного климата, использованные как критерии экстремальных пороговых значений, приведены в табл. 1.

В качестве эмпирических данных для сравнения с модельными результатами использовались суточные данные реанализа ERA5 с горизонтальным разрешением 0.25° × 0.25° за период 1979–2021 гг. [23]. Для оценки более продолжительных наблюдавшихся изменений в среднем режиме температуры и осадков использовались средне-

месячные данные CRU TS4.05 за период 1901–2021 гг., полученные с помощью интерполяции данных станционных наблюдений на широтно-долготную сетку  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  [22].

В качестве количественной характеристики климатических изменений используется коэффициент линейного тренда для 40-летних периодов 1981–2020, 2021–2060 и 2061–2100 гг. Проводились оценки статистической значимости трендов с использованием F-критерия Фишера с уровнем значимости 0.05. Для оценки модельных изменений климата, помимо анализа данных индивидуальных моделей, использовались осредненные по ансамблю из 19-ти выбранных моделей анализируемые характеристики. 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 индивидуальных моделей (например, [21, 28]). Следует отметить, что такой подход, будучи самым распространенным, не всегда оптимальный и более сложные статистические модели предлагаются для анализа мульти-модельных результатов [6, 17].

Поскольку цель работы — оценка изменений климата, для иллюстрации результатов использовались аномалии модельных и эмпирических данных относительно периода 1981–2010 гг., что позволяет исключить систематические ошибки моделей.

Источник наиболее достоверных данных по температуре и осадкам — это наблюдения на метеорологических станциях. Для относительно небольшого по размеру полуострова со сложной орографией даже хорошо развитая метеорологическая сеть не всегда может обеспечить репрезентативную информацию по изменениям климата для отдельных регионов и полуострова в целом, тем более что это сложно сделать на основе трех доступных продолжительных рядов наблюдений на станциях Симферополь, Феодосия и Керчь. Использование сеточных данных реанализа, полученных в модели атмосферы, ассимилирующей различные эмпирические данные, в том числе влажность, температуру и скорость ветра, — это вынужденная замена эмпирических данных для сравнения с сеточными данными моделей, осредненными для всего полуострова. В целом данные реанализа показали хорошее соответствие данным наблюдений для температуры и удовлетворительное — для осадков. Проведен сравнительный анализ данных реанализа ERA5 и архива CRU с данными доступных метеорологических станций за период 1981–2020 гг. В табл. 2 представлены результаты сравнения средних характеристик осадков и температуры за исследуемый

период, а также значения коэффициентов линейных трендов по основным показателям.

Между станционными данными и данными реанализа ERA5, а также архива CRU TS для температуры установлена высокая статистически значимая связь. Коэффициенты корреляции для всех станций оказались  $\geq 0.95$ . Средняя ошибка среднесезонной температуры для станций не выходит за границы  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ . Значения трендов температуры в сеточных архивах также близки к наблюдаемому на станциях значениям. Для режима осадков коэффициенты корреляции ниже, чем для температуры, но также статистически значимы и составляют преимущественно 0.7–0.8. При этом средние ошибки оценок сезонных сумм осадков могут достигать 30%, что говорит о низком качестве данных по осадкам в сеточных архивах данных. Отметим, что во всех сеточных архивах есть ошибки, связанные с процедурой интерполяции, и невозможно получить идеальной согласованности сеточных и станционных данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Тренды анализируемых характеристик для зимы, лета и года в среднем для трех 40-летних периодов: современного (1981–2020 гг.), ближайших 40 лет (2021–2060 гг.) и второй половины XXI в. (2061–2100 гг.) — представлены в табл. 3. Для моделей климата показаны средние по ансамблю моделей значения, что представляет собой отклик на внешние воздействия (антропогенные и естественные). Для современного периода модели в среднем для ансамбля хорошо воспроизводят наблюдаемые изменения всех рассматриваемых температурных характеристик, показывая не только качественное, но и количественное (как правило, с расхождением  $\leq 30\%$ ) соответствие результатов. Изменения практически всех характеристик, за исключением числа дней с экстремально низкой температурой зимой, статистически значимы как в наблюдениях, так и в моделях и соответствуют ожидаемым при глобальном потеплении тенденциям — росту средней температуры при снижении/росте числа дней с экстремально низкими/высокими температурами как зимой, так и летом. Отметим, что модели, как и эмпирические данные, демонстрируют более сильные изменения всех трех температурных характеристик летом, чем зимой. В частности, как по эмпирическим данным, так и по данным модели климата количество дней с экстремально высокими значениями температуры летом в период 1981–2020 гг. выросло в  $\geq 2$  раза.

Динамика изменений среднесезонной температуры для зимы и лета в XX и XXI вв. по данным моделей в сопоставлении с эмпирическими данными показана на рис. 1. Изменения числа дней с температурными экстремумами приведены на

**Таблица 2.** Средние значения, коэффициенты корреляции и коэффициенты линейных трендов характеристик осадков и температуры по данным метеорологических станций и по данным реанализа ERA5 и CRU TS в ближайших к станциям узлах сетки

	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год
	33946 Симферополь			ERA5 Симферополь			CRU TS Симферополь		
Средняя $T$ , °C	1.2	21.7	11.2	0.9	20.4	10.3	1.2	20.7	10.6
Средняя сумма осадков, мм/сезон	120	145.3	497.8	159.3	190	658.8	189.6	155.5	643.7
Коэффициент корреляции для средней $T$				0.97*	0.98*	0.96*	0.96*	0.98*	0.98*
Коэффициент корреляции для сумм осадков				0.89*	0.71*	0.87*	0.86*	0.7*	0.85*
Тренды средней $T$ , °C/10 лет	0.5*	0.8*	0.62*	0.4*	0.8*	0.57*	0.45*	0.7*	0.56*
Тренды сумм осадков, %/10 лет	1.24	-7.29	-2.21	-3.18	-8.50	-4.63	2.60	-5.07	-0.62
Тренды интенсивности осадков, мм/д/10 лет	-0.14	-0.72*	-0.30	-0.04	-0.15	-0.05			
	33976 Феодосия			ERA5 Феодосия			CRU TS Феодосия		
Средняя $T$ , °C	2.6	23.4	12.6	3.5	23.1	12.7	2.1	23.3	12.3
Средняя сумма осадков, мм/сезон	122.9	115.1	468.9	112.5	79	379.5	116.6	124.7	446.8
Коэффициент корреляции для средней $T$				0.98*	0.97*	0.98*	0.97*	0.98*	0.98*
Коэффициент корреляции для сумм осадков				0.87*	0.75*	0.80*	0.82*	0.76*	0.79*
Тренды средней $T$ , °C/10 лет	0.48*	0.82*	0.63*	0.54*	0.75*	0.64*	0.44*	0.71*	0.57*
Тренды сумм осадков, %/10 лет	2.61	-2.50	-2.48	0.41	-10.7	-5.12*	1.96	-6.66	-1.44
Тренды интенсивности осадков, мм/д/10 лет	0.09	-0.05	0.03	0.04	-0.11	-0.04			
	33983 Керчь			ERA5 Керчь			CRU TS Керчь		
Средняя $T$ , °C	1.4	22.8	11.7	2.2	23.5	12.3	1.7	22.7	11.8
Средняя сумма осадков, мм/сезон	106.8	124.7	425.8	124.3	113.2	454.8	124.6	129.1	473.3
Коэффициент корреляции для средней $T$				0.98*	0.97*	0.97*	0.96*	0.96*	0.98*
Коэффициент корреляции для сумм осадков				0.87*	0.62*	0.80*	0.85*	0.59*	0.73*
Тренды средней $T$ , °C/10 лет	0.51*	0.82*	0.62*	0.4*	0.73*	0.55*	0.46*	0.7*	0.57*
Тренды сумм осадков, %/10 лет	0.02	-8.27	-3.99	0.21	-10.7*	-5.58*	1.79	-5.79	-0.55
Тренды интенсивности осадков, мм/д/10 лет	-0.10	-0.22	-0.06	0.07	-0.15	-0.04			

\* Ячейки с корреляциями и трендами, статистически значимыми на уровне 5%.

рис. 2. Как отмечалось, модели (в среднем по ансамблю) достаточно хорошо воспроизводят изменения за последние 40 лет. В ближайшие ~20 лет изменения среднесезонных значений температуры и числа дней с экстремально высокой температурой практически не зависят от выбора сценария антропогенного воздействия и меняются приблизительно теми же темпами, как и в современный период. Затем начиная с 2040-х гг. при сценарии SSP245 рост этих характеристик заметно замедляется относительно сценария SSP585.

В результате к концу века при более агрессивном сценарии изменения будут примерно вдвое более сильными, чем при умеренном сценарии. Число дней с экстремально низкими значениями температуры при обоих сценариях в среднем для ансамбля уменьшается практически до нуля уже к 2040-м гг.

Изменения характеристик осадков по данным наблюдений в современный период не являются статистически значимыми (табл. 3), в том числе и

**Таблица 3.** Коэффициенты линейных трендов характеристик осадков и температуры по данным реанализа ERA5 и моделей CMIP6 (среднее по ансамблю 19 моделей)

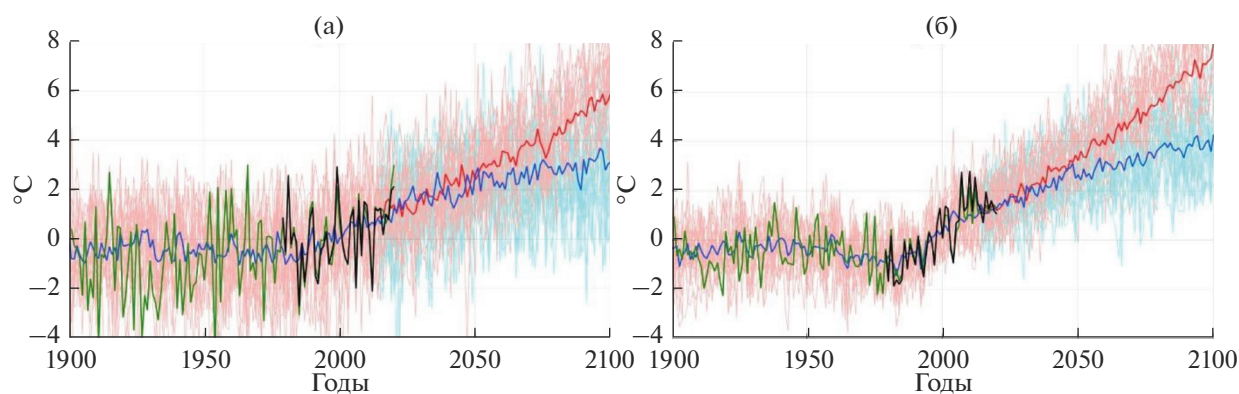
Характеристики	Зима	Лето	Год	Зима	Лето	Год
1981–2020 гг.						
	Модели CMIP6			ERA5		
Средняя $T$ , °C/10 лет	0.54*	0.68*	0.54*	0.37*	0.84*	0.60*
Число дней с экстремально высокой $T$ , дней/10 лет	1.44*	3.45*	7.91*	0.98*	2.71*	7.60*
Число дней с экстремально низкой $T$ , дней/10 лет	-0.98*	-1.38*	-3.84*	-0.24	-1.72*	-4.55*
Сумма осадков, %/10 лет	2.50*	-1.55	1.50*	-0.68	-9.93	-4.74
Интенсивность осадков, мм/день/10 лет	0.06*	0.00	0.04*	0.03	-0.14	-0.03
Число дней с экстремальными осадками, дней/10 лет	0.20*	0.01	0.33*	0.04	-0.27	-0.39
Вклад экстремальных осадков в общую сумму, %/10 лет	1.54*	0.13	0.74*	0.29	-2.00	0.29
2021–2060 гг.						
	Модели CMIP6 ssp245			Модели CMIP6 ssp585		
Средняя $T$ , °C/10 лет	0.26*	0.43*	0.33*	0.56*	0.69*	0.59*
Число дней с экстремально высокой $T$ , дней/10 лет	1.53*	4.15*	8.54*	3.17*	6.71*	14.41*
Число дней с экстремально низкой $T$ , дней/10 лет	-0.24*	-0.34*	-1.31*	-0.42*	-0.35*	-1.70*
Сумма осадков, %/10 лет	0.92	-3.26*	-0.99	-0.52	-6.06*	-2.13*
Интенсивность осадков, мм/день/10 лет	0.02	-0.02	0.00	0.02	-0.01	0.01
Число дней с экстремальными осадками, дней/10 лет	0.06	-0.02	-0.11	0.05	-0.05	-0.07
Вклад экстремальных осадков в общую сумму, %/10 лет	0.37	0.16	-0.09	0.97*	0.07	0.42
2061–2100 гг.						
	Модели CMIP6 ssp245			Модели CMIP6 ssp585		
Средняя $T$ , °C/10 лет	0.18*	0.28*	0.22*	0.69*	0.89*	0.74*
Число дней с экстремально высокой $T$ , дней/10 лет	1.10*	2.27*	4.97*	4.97*	6.18*	17.4*
Число дней с экстремально низкой $T$ , дней/10 лет	-0.06	-0.14*	-0.43*	-0.15*	-0.08*	-0.71*
Сумма осадков, %/10 лет	0.14	-1.05	0.07	0.19	-3.75*	-0.96*
Интенсивность осадков, мм/день/10 лет	0.00	0.00	0.02	0.03	-0.02	0.02*
Число дней с экстремальными осадками, дней/10 лет	0.02	-0.01	0.11	0.09	-0.06*	0.05
Вклад экстремальных осадков в общую сумму, %/10 лет	0.06	-0.08	0.37	1.25*	-0.74	0.34

\* Ячейки с трендами, статистически значимыми на уровне 5%.

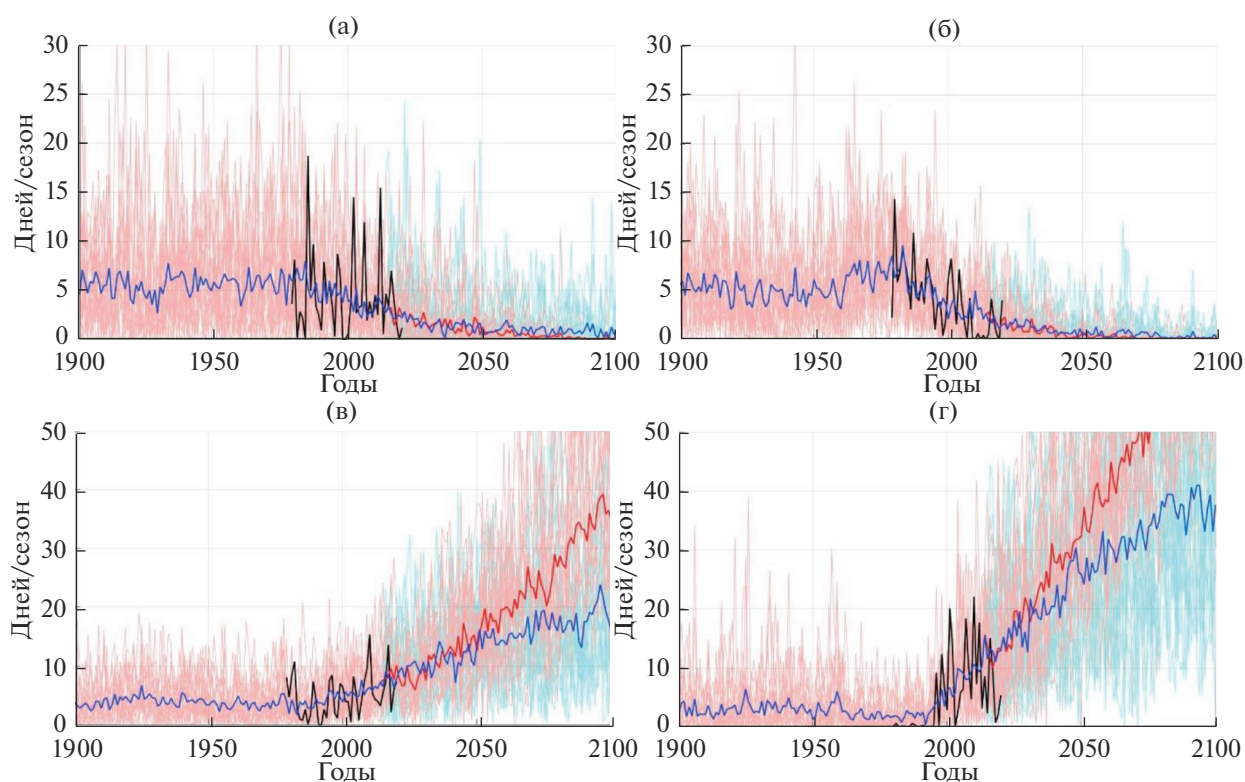
для суммы летних осадков, линейный тренд которой в последние четыре десятилетия составил почти 10%/десятилетие. Это обусловлено сильной межгодовой изменчивостью среднесезонных осадков с межгодовыми вариациями, часто составляющими ±50% от среднеклиматических значений (рис. 3). Модели климата в среднем для ансамбля, напротив, показывают статистически значимый рост всех анализируемых характеристик осадков зимой и в среднем для года, летом отмечается статистически незначимое снижение суммы осадков (табл. 2). Межгодовая изменчивость средних для ансамбля характеристик существенно ниже, чем по данным наблюдений, 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 (рис. 3, 4). Следует также отметить, что модели в целом заметно (на 25%) переоценивают интенсивность осадков зимой и недооценивают летом.

Будущие изменения характеристик осадков в среднем для ансамбля анализируемых моделей также в основном не характеризуются сильными трендами и не являются статистически значимыми, за исключением сумм летних осадков, которые демонстрируют значимое снижение в период 2021–2060 гг. – на 3.3%/десятилетие и 6.1%/десятилетие для сценариев SSP245 и SSP585 соответ-



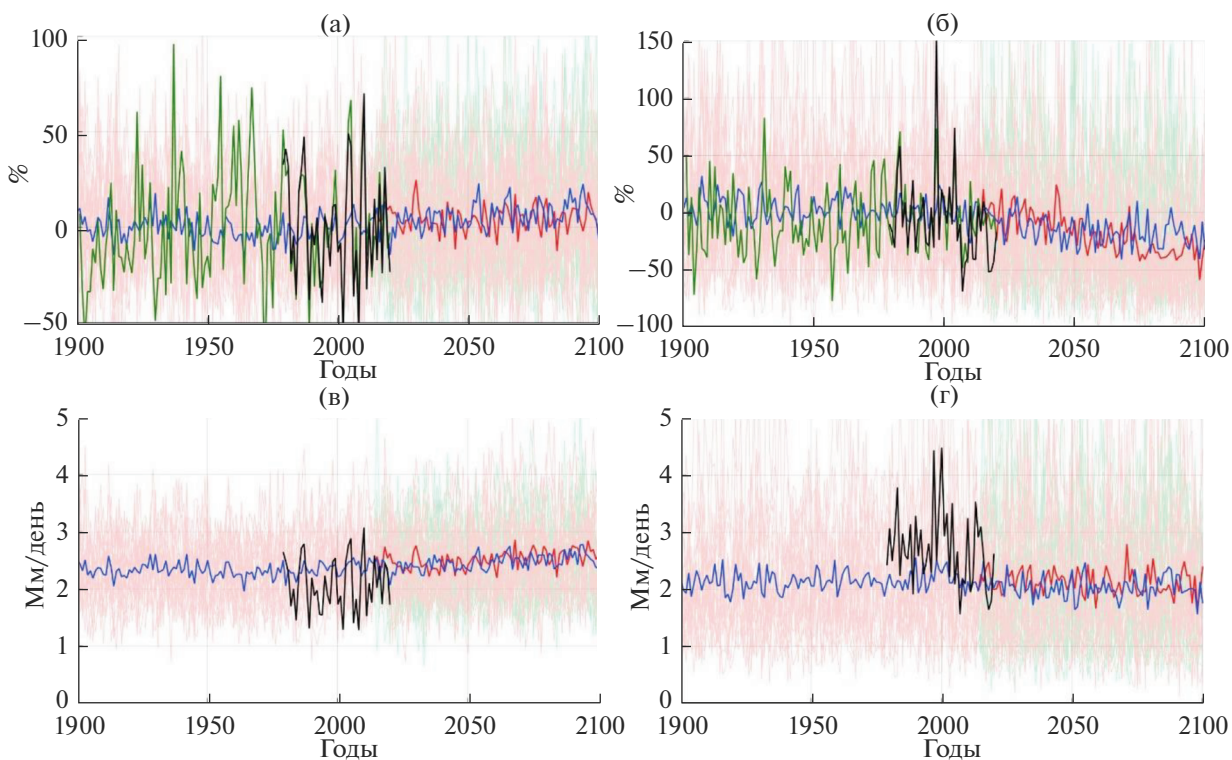
**Рис. 1.** Изменения аномалии среднесезонной приземной температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) в Крыму (относительно средних значений для периода 1981–2010 гг.) зимой (а) и летом (б) по данным наблюдений CRUTS4.05 (зеленая кривая), реанализа ERA5 (черная кривая) и данным 19-ти моделей CMIP6. Синей и красной жирными кривыми показаны средние по ансамблям SSP245 и SSP585 моделей значения. Результаты индивидуальных моделей ансамбля показаны голубыми и розовыми тонкими кривыми для сценариев SSP245 и SSP585 соответственно. До 2014 г. оба сценария и результаты моделирования идентичны.



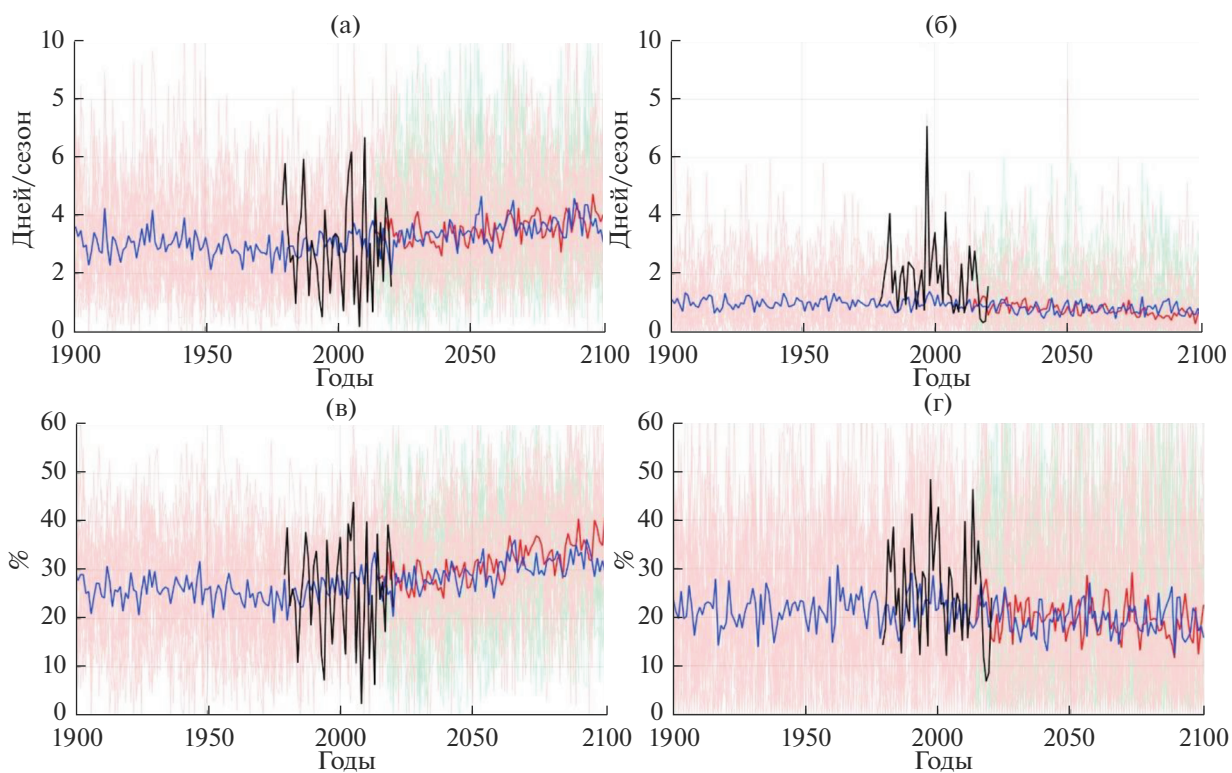
**Рис. 2.** То же, что на рис. 1, но для числа дней в сезон с экстремально низкими (а, б) и высокими (в, г) значениями температуры зимой (а, в) и летом (б, г).

ственно. Эти изменения хорошо заметны на рис. 3б. Следует отметить, что для периода 2061–2100 гг. с большим радиационным воздействием в обоих сценариях темпы снижения летних осадков уменьшаются в  $\sim 2$  раза. Если для умеренного сценария SSP245 это можно объяснить соответствующим

снижением темпов роста приповерхностной температуры, то для сценария SSP585, где температура продолжает расти теми же темпами (рис. 1), такое снижение должно объясняться другими факторами, наиболее вероятно — связанными с изменениями атмосферной циркуляции.



**Рис. 3.** То же, что на рис. 1, но для относительных (%) изменений среднесезонных сумм осадков (а, б) и интенсивности осадков (мм/день) (в, г) зимой (а, в) и летом (б, г).



**Рис. 4.** То же, что на рис. 1, но для числа дней в сезон с экстремальными осадками (а, б) и доли экстремальных осадков в общей сумме сезонных осадков (в, г) зимой (а, в) и летом (б, г).



В полученных результатах анализа изменений экстремальности осадков в моделях климата следует отметить статистически значимый рост вклада экстремальных осадков в общую сумму осадков зимой при агрессивном сценарии антропогенного воздействия SSP585 для обоих 40-летних периодов (2021–2060 гг. и 2061–2100 гг.), что хорошо заметно на рис. 4в.

В зимний период также ожидается рост числа дней с экстремальными осадками (рис. 4а), но он статистически незначим (табл. 3). Следует отметить, что, несмотря на заметное уменьшение сумм летних осадков в моделях, значимого снижения интенсивности осадков и их экстремальности не выявлено (рис. 4б, 4г; табл. 3). Только летом для сценария SSP585 в период 2061–2100 гг. отмечается небольшое, но статистически значимое снижение количества дней с экстремальными осадками (0.24 дня за весь период). Также отметим, что в период 1981–2020 гг. модели демонстрируют статистически значимый рост средних осадков, их интенсивности и экстремальности зимой, который для будущих периодов (за исключением вклада экстремальных осадков в общую сумму, как указано выше) сменяется слабым и незначимым увеличением. Эти результаты указывают на нелинейный отклик зимних осадков на рост температуры в моделях климата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены сценарные проекции изменений климата в XXI в. в Крыму по данным ансамбля моделей климата последнего поколения CMIP6 для агрессивного SSP585 и умеренного SSP245 сценариев антропогенного воздействия. Анализировались изменения среднесезонных для зимы и лета температуры и осадков, количества дней с экстремальными аномалиями температуры и осадков, интенсивности осадков и вклада сильных осадков в общую сезонную сумму осадков. Для современного периода данные моделей сравниваются с данными реанализа ERA5 и интерполированными сеточными данными наблюдений CRUTS4.05.

К концу XXI в. в среднем по ансамблю моделей ожидается повышение летней температуры на  $\sim 6^\circ\text{C}$  и на  $2.5^\circ\text{C}$  для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. Для зимы рост температуры значительно меньше и составляет  $3.5$  и  $1.5^\circ\text{C}$ . Летом число дней с экстремально высокими значениями температуры (95%-й перцентиль функции распределения для 1981–2010 гг.) уже в середине XXI в. вырастет в 5–6 раз, а к концу века даже для умеренного сценария составит  $\sim 40$  дней. Для сезонных осадков характерна сильная межгодовая изменчивость, на фоне которой зимой в моделях отмечается статистически незначимый рост, а летом к концу XXI в. ожидается существенное

уменьшение осадков на 15 и 40% для сценариев SSP585 и SSP245 соответственно. При этом летом не ожидается статистически значимого снижения интенсивности и экстремальности осадков, а зимой доля экстремальных осадков в общей сумме осадков существенно растет – от 25 до 35%. Отсутствие снижения числа дней с экстремальными осадками летом, несмотря на существенное уменьшение их сезонных сумм, может объясняться ростом вклада конвективных осадков за счет снижения вклада обложных осадков. Такая тенденция отмечается в последние десятилетия по результатам анализа эмпирических данных [16]. Важно отметить, что в ближайшие два десятилетия прогнозируемые изменения практически не зависят от анализируемых сценариев антропогенного воздействия.

Представленные тенденции согласуются с результатами расчетов по модели GFDL-CM3 из ансамбля моделей климата предыдущего поколения CMIP5, которые показывают небольшое увеличение повторяемости экстремальных осадков (для годовых значений) к концу XXI в. для побережья Крымского п-ова [4]. В работе [34] по данным шести моделей проекта CMIP6 в регионе Севастополя отмечается продолжение современных тенденций роста температуры и также индекса засушливости Селянинова в XXI в., что может негативно отразиться на развитии сельского хозяйства. Это согласуется с тенденциями, полученными в данной работе для Крыма в целом.

Следует отметить, что ввиду достаточно грубого пространственного разрешения глобальных моделей климата, важные эффекты, связанные с орографией и пространственными контрастами свойств подстилающей поверхности, могут недостаточно корректно воспроизводиться в моделях, поэтому необходимо использовать региональные модели климата для более реалистичных и детализированных оценок. Как показали эксперименты с региональной моделью для Черноморско-Каспийского региона [7], и рост температуры, и летнее уменьшение осадков в регионе происходят на  $\sim 30\%$  интенсивнее, чем в глобальной модели грубого пространственного разрешения. Для корректного воспроизведения интенсивности конвективных осадков и их изменений при потеплении климата необходимо использовать негидростатические модели с еще более детальным разрешением ( $\leq 1$  км) [26].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина М.А., Семенов В.А., Чернокульский А.В. Исследование роли глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа по результатам экспериментов с моделью климата //

- Фундаментальная и прикладная климатология. 2019. Т. 3. С. 59–75.
2. *Алешина М.А., Торопов П.А., Семенов В.А.* Изменения температурно-влажностного режима Черноморского побережья Кавказа в период 1982–2014 гг. // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 41–53.
  3. *Бардин М.Ю. и др.* Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 29–45.
  4. *Вышкваркова Е.В., Воскресенская Е.Н.* Изменение полей экстремальных осадков на территории Крыма и в прибрежной зоне Черного моря в XXI веке // Системы контроля окружающей среды. 2016. № 4. С. 86–89.
  5. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2020. 96 с.
  6. *Елисеев А.В., Семенов В.А.* Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата // ДАН. 2016. Т. 471. № 2. С. 214–218.
  7. *Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е.* Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // Морской гидрофиз. журн. 2015. № 2 (182). С. 3–14.
  8. *Коваленко О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 2. С. 42–62.
  9. *Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю., Золина О.Г.* Крупномасштабные индикаторы экстремальных осадков в прибрежных природно-экономических зонах европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2015. № 11. С. 20–32.
  10. *Мохов И.И., Семенов В.А.* Погодно-климатические аномалии в российских регионах и их связь с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28.
  11. *Полонский А.Б., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н.* Статистические характеристики циклонов и антициклонов над Черным морем во второй половине XX века // Морской гидрофиз. журн. 2007. № 6. С. 47–58.
  12. *Полонский А.Б., Кибальчич И.А.* Циркуляционные индексы и температурный режим Восточной Европы в зимний период // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 5–17.
  13. *Семенов В.А., Мохов И.И., Латиф М.* Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
  14. *Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V.* A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. № 10. P. 105004.
  15. *Arzhanov M.M., Eliseev A.V., Mokhov I.I.* Impact of climate changes over the extratropical land on permafrost dynamics under RCP scenarios in the 21st century as simulated by the IAP RAS climate model // Russian Meteorol. Hydrol. 2013. V. 38. № 7. P. 456–464.
  16. *Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O. et al.* Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environ. Res. Lett. 2019. V. 14. № 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
  17. *Christiansen B.* Understanding the Distribution of Multimodel Ensembles // J. of Climate. 2020. V. 33. № 21. P. 9447–9465.
  18. *Croitoru A. E., Chitoroiu B. C., Todorova V. I. et al.* Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast // Global and Planetary Change. 2013. V. 102. P. 10–19.
  19. *Eyring V., Bony S., Meehl G. A. et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geosci. Model Development. 2016. V. 9. № 5. P. 1937–1958.
  20. *Gelfan A., Semenov V.A., Gusev E. et al.* Large-basin hydrological response to climate model outputs: uncertainty caused by internal atmospheric variability // Hydrol. and Earth System Sci. 2015. V. 19. № 6. P. 2737–2754.
  21. *Gleckler P.J., Taylor K.E., Doutriaux C.* Performance metrics for climate models // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 2008. V. 113. № D6. <https://doi.org/10.1029/2007jd008972>
  22. *Harris I., Osborn T.J., Jones P. et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Sci. data. 2020. T. 7. № 1. C. 1–18.
  23. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. V. 10.
  24. *Maslova V.N., Voskresenskaya E.N., Lubkov A.S. et al.* Intense Cyclones in the Black Sea Region: Change, Variability, Predictability and Manifestations in the Storm Activity // Sustainability. 2020. V. 12. № 11. P. 4468.
  25. *Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al.* IPCC, 2021. 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 Univ. Press. 2021. August.
  26. *Meredith E.P., Maraun D., Semenov V.A. et al.* Evidence for added value of convection-permitting models for studying changes in extreme precipitation // J. Geophys. Res. Atmospheres. 2015. V. 120. № 24. P. 12500–12513. <https://doi.org/10.1002/2015JD024238>
  27. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. et al.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // Nature Geosci. 2015. V. 8. № 8. P. 615.
  28. *Pierce D.W., Barnett T.P., Santer B.D. et al.* Selecting global climate models for regional climate change studies // Proc. National Acad. Sci. 2009. V. 106. № 21.

- P. 8441–8446.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0900094106>
29. *Sakalli A., Bağusta N.* Sea surface temperature change in the Black Sea under climate change: A simulation of the sea surface temperature up to 2100 // *Int. J. Climatol.* 2018. V. 38. № 13. P. 4687–4698.
  30. *Serreze M.C., Barry R.G.* Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // *Global and planetary change.* 2011. V. 77. № 1–2. P. 85–96.
  31. *Trenberth K.E.* Changes in precipitation with climate change // *Climate Res.* 2011. V. 47. № 1–2. P. 123–138.  
<https://doi.org/10.3354/cr00953>
  32. *Van Vuuren D.P., Kriegler E., O'Neill B.C. et al.* A new scenario framework for climate change research: scenario matrix architecture // *Climatic Change.* 2014. T. 122. № 3. С. 373–386.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-013-0906-1>
  33. *Vyshkvarkova E.* Changes in extreme precipitation over the North Caucasus and the Crimean Peninsula during 1961–2018 // *J. Hung. Meteorol. Serv.* 2021. V. 125. P. 321–336.
  34. *Vyshkvarkova E., Rybalko E., Marchukova O. et al.* Assessment of the Current and Projected Conditions of Water Availability in the Sevastopol Region for Grape Growing // *Agronomy.* 2021. V. 11. № 8. P. 1665.