



ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЗИМНИХ ОСАДКОВ В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ В XXI ВЕКЕ ПРИ РАЗНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СЦЕНАРИЯХ

А.Б. Полонский, П.А. Сухонос

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

E-mail: pasukhonis@mail.ru

По данным расчётов региональной климатической модели SMHI-RCA4 из проекта CORDEX получены проекции изменения количества зимних атмосферных осадков (АО) для Черноморского региона в XXI веке при разных климатических сценариях. Рассмотрены изменения количества АО в декабре в краткосрочной (2021–2050 гг.) и среднесрочной (2051–2080 гг.) перспективе по отношению к историческому периоду (1976–2005 гг.). Во второй половине XXI столетия для сценариев RCP4.5 и RCP8.5 отмечается значимый рост медианы количества АО преимущественно над всей территорией Черноморского региона.

Ключевые слова: атмосферные осадки, проекции, модель SMHI-RCA4, климатические сценарии, Чёрное море

Поступила в редакцию: 04.10.2023. После доработки: 02.11.2023.

Введение. Детальный анализ климатических изменений в XXI веке под влиянием антропогенных факторов на региональном масштабе представляет собой актуальную и практически значимую задачу. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации, посвященные этой тематике, в том числе, основанные на анализе региональных климатических расчётов, выполненных в рамках исследовательского проекта Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) [1]. Эти расчёты проведены с использованием метода динамической регионализации (downscaling) результатов глобальных расчётов, осуществлённых в рамках интеркалибрации климатических моделей, отобранных по единым критериям и входящих в консорциум Climate Model Intercomparison Project (CMIP). К настоящему времени выполнены региональные расчёты по результатам 5-ой фазы проекта CMIP, полученным на основе климатических сценариев, принятых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (так называемые, Representative Concentration Pathway – RCP) [2]. Эти сценарии различаются между собой величинами концентрации парниковых

газов в атмосфере в XXI веке и связанными с ними приращениями глобального радиационного притока тепла в нижнюю тропосферу к 2100 году. Так, например, в сценарии RCP4.5 предполагается, что к концу XXI столетия увеличение радиационного воздействия на нижнюю тропосферу составит 4,5 Вт/м². В результате повышение глобальной приземной температуры воздуха (ПТВ) по сравнению с доиндустриальным периодом будет варьировать в пределах 2,0–4,5°C. Это существенно превышает рост ПТВ, ожидаемый при реализации более оптимистического сценария RCP2.6, при котором рост ПТВ с большей вероятностью не будет превышать 2°C [3, 4]. В наиболее пессимистическом сценарии (RCP8.5 или, так называемом, business as usual) к концу века ожидается рост антропогенного радиационного воздействия до 8,5 Вт/м². Этот дополнительный приток тепла в нижнюю тропосферу будет вызывать повышение средней глобальной ПТВ как минимум на 3,5°C [5]. Разброс приведенных оценок объясняется тем, что воспроизведение исторических и будущих изменений климата разными климатическими моделями существенно различается [6].

Оценки изменений количества атмосферных осадков (АО) в XX–XXI в. на территории России по данным глобальных климатических моделей из проекта CMIP6 для наиболее неблагоприятного сценария (business as usual) показали рост относительных сумм АО зимой на большей части территории России [7]. Несмотря на сильные межмодельные различия, к концу XXI столетия тенденции к увеличению зимних сумм АО на Европейской территории России становятся более выраженными.

Как известно, Черноморский регион характеризуется высокой пространственной неоднородностью [8] и неопределённостью тенденций климатических изменений в историческом периоде [9]. Для указанного региона в некоторых работах получены проекции изменений количества АО, которые зачастую противоречат друг другу. Например, результаты климатических расчётов для Черноморского региона до конца XXI столетия с использованием региональной численной модели атмосферной циркуляции HadRM3P и входных данных глобальной атмосферной модели HadAM3P показали, что по одному из самых неблагоприятных сценариев (A2), рассмотренных в рамках проекта CMIP3, количество зимних АО над Чёрным морем в 2071–2100 гг. возрастёт на 15–20% по отношению к контрольному периоду (1961–1990 гг.) [10]. Авторы связывают отмеченный рост количества АО с усиленной конвективной активностью над более тёплым морем. Вместе с тем, построение региональных проекций изменений климата Черноморского региона к концу XXI столетия с использованием региональной численной модели климата HadRM3P и входных данных глобальной модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) INMCM4 показало, что для пессимистичного сценария RCP8.5 изменение количества АО в зимний сезон в 2071–2100 гг. слабо выражено по отношению к контрольному периоду (1971–2000 гг.) [11]. Проекция изменения климата в Черноморско–Каспийском регионе с использованием двух моделей региональной атмосфер-

ной циркуляции RegCM4 и HadRM3P получены в [12]. В качестве входных данных использовались результаты моделирования, проведенного в рамках МОЦАО INMCM4. Авторы подтвердили полученный в работе [11] результат о статистически незначимом изменении количества зимних АО над Чёрным морем в 2071–2100 гг. по отношению к последней трети XX века для пессимистичного сценария (RCP8.5).

Таким образом, тенденции изменения количества АО в XXI веке в Черноморском регионе неоднозначны и требуют существенного уточнения. Между тем, осадки являются одной из главных составляющих водного баланса Черного моря. Поэтому целью работы является построение проекций изменения количества зимних АО в Черноморском регионе в краткосрочной (2021–2050 гг.) и среднесрочной (2051–2080 гг.) перспективе по отношению к историческому периоду (1976–2005 гг.) для всех сценариев изменения концентрации парниковых газов в атмосфере с использованием региональной климатической модели (PKM) SMHI-RCA4 из проекта CORDEX. Указанная PKM адекватно воспроизводит среднее количество и долгосрочные тенденции изменений АО над Чёрным морем в исторический период [13]. Основное внимание сосредоточено на анализе декабрьских значений, поскольку в этом месяце отмечается максимальное количество АО в годовом цикле [14].

Данные и методы. Использованы месячные величины количества АО в декабре по данным PKM SMHI-RCA4 с входными данными из глобальной климатической модели (ГКМ) ICHEC-EC-EARTH (член ансамбля ГКМ r12i1p1) за период 1951–2099 гг., входящей в исследовательский проект CORDEX [1]. Данные находятся в свободном доступе на сайте [Climate Explorer \(https://climexp.knmi.nl/\)](https://climexp.knmi.nl/). Данные PKM охватывают территорию Европейского региона (27,75°–72,25° с. ш.; 24,75° з. д. – 44,75° в. д.) и имеют пространственное разрешение 0,5°×0,5°. Для сравнения с модельными расчётами величин количе-

ства АО использовались данные ре-анализа ERA5 с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ за период 1959–2020 гг. [15]. Исходные величины количества АО по данным РКМ и ре-анализа имеют размерность $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$ и для удобства сравнения были преобразованы в эквивалентные мм/месяц. Использовались данные численных экспериментов и ре-анализа для Черноморского региона ($40^\circ\text{--}48^\circ$ с. ш. $26^\circ\text{--}42^\circ$ в. д.).

По данным о количестве АО для акватории Чёрного моря в декабре рассчитаны медиана, её доверительный интервал и долгосрочные тенденции, оцененные с помощью метода квантильной регрессии [16]. Определение стандартных ошибок коэффициентов квантильной регрессии выполнено методом бутстреп [17], на основе которого могут быть получены наиболее реалистичные оценки значимости линейных трендов [18]. Методом случайных испытаний генерировались 1000 подвыборок, каждая из которых представляла временной ряд, в котором (по сравнению с исходным временным рядом) отсутствовали случайным образом исключенные значения (из временного ряда исключалось ~30% значений). По каждой из выборок вычислялись коэффициенты трендов по методу квантильной регрессии для 9 значений квантилей: от 0,1 с шагом 0,1 до 0,9 включительно. Как правило, оценка значимости коэффициентов медианного тренда производилась на доверительном уровне 99%. Рассмотрены исторический (1976–2005 гг.) и будущие периоды (2021–2050 гг. и 2051–2080 гг.) при разных сценариях изменения концентрации парниковых газов в атмосфере (RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5). Изменение количества АО в Черноморском регионе в будущем рассчитывается как разность между медианными значениями климатической переменной за будущие периоды и её значениями в историческом периоде. Статистическая значимость полученных разностных величин, представляющих собой изменения медианы количества АО за 30-летние будущие периоды по отношению к историческому периоду, оценивалась с использо-

ванием стандартного t-теста Стьюдента. Выбирался 95%-й уровень значимости.

Результаты. Перед тем, как перейти к анализу долгосрочных тенденций изменения количества АО при разных сценариях изменения концентрации парниковых газов в атмосфере, проанализируем пространственное распределение медианных значений количества АО в Черноморском регионе. Для этого рассмотрим соответствующие карты количества декабрьских АО, полученные за исторический период по данным численного эксперимента и ре-анализа ERA5. Рис. 1 подтверждает хорошо известный факт, что АО распределены крайне неоднородно по акватории моря. Наибольшее количество АО выпадает в прибрежной зоне, особенно вдоль Анатолийского и Кавказского побережий. В целом оба рассматриваемых массива данных воспроизводят основные особенности пространственного распределения количества АО в изучаемом регионе. Вместе с тем, необходимо отметить и некоторые различия. Так, в Азовском море величина медианы количества АО по данным ре-анализа ERA5 находится в диапазоне 45–50 мм/мес, а по данным РКМ уменьшается до 35 мм/мес. В Крымских горах величина медианы количества АО по данным ре-анализа ERA5 составляет около 70 мм/мес, а по данным РКМ – около 120 мм/мес. Наибольшие различия отмечаются в Кавказских горах, где по данным ре-анализа ERA5 количество АО составляет немногим более 200 мм/мес, а по данным РКМ – около 400 мм/мес. Величина медианы количества АО на Анатолийском побережье, оцененная по двум используемым массивам данных, одинакова и составляет около 150 мм/мес. Однако этот локальный максимум по данным ре-анализа ERA5 находится в прибрежной зоне, а по данным РКМ он смещён к юго-востоку. В юго-восточной части Чёрного моря (в окрестности 42° с. ш. 36° в. д.) по данным РКМ отмечается локальный минимум медианы количества АО, составляющий 25 мм/мес, который не выделяется по данным ре-анализа ERA5. Таким образом, крупно-

масштабные особенности распределения количества АО в Черноморском регионе, характеризующимся горизонтально-неоднородным рельефом подстилающей поверхности, полученные в ре-анализе ERA5, сохраняются и в РКМ. Вместе с

тем, отмечаются значительные расхождения между прогностическими расчетами и данными ре-анализа. Они максимальны в районах с наиболее сложным рельефом.

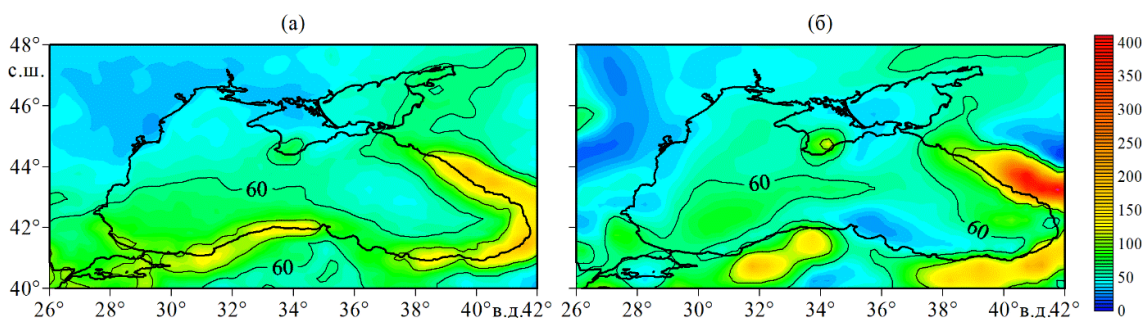


Рис. 1. Пространственное распределение медианных значений количества атмосферных осадков (мм/месяц) в Черноморском регионе в декабре в исторический период 1976–2005 гг. по данным ре-анализа ERA5 (а) и региональной климатической модели SMHI-RCA4 (б). Показаны изолинии 60 и 100 мм/мес

Fig. 1. Spatial distribution of median values of precipitation (mm/month) in the Black Sea region in December in the historical period 1976–2005 based on the ERA5 re-analysis data (a) and the regional climate model SMHI-RCA4 data (b). Isolines of 60 and 100 mm/month are shown

Рассмотрим далее статистические характеристики временных рядов количества АО над Чёрным морем в декабре по данным ре-анализа ERA5 и РКМ SMHI-RCA4. В общий для ре-анализа и РКМ временной отрезок контрольного периода (1959–2005 гг.) медианные тренды (для значения квантиля 0,5) отрицательны и величины их коэффициентов почти совпадают (рис. 2). Это означает, что в исторический период РКМ адекватно воспроизводит уменьшение количества АО над Чёрным морем. За весь доступный период (1951–2099 гг.) отмечается положительный, но не значимый тренд количества АО над Чёрным морем для всех сценариев предполагаемого изменения климата. Отметим, что при сценарии RCP2.6 в первый (2021–2050 гг.) и второй (2051–2080 гг.) будущие периоды во временной изменчивости количества АО происходит изменение спектрального состава: в первом периоде преобладают десятилетние, а во втором периоде – межгодовые колебания (рис. 2, а).

Из табл. 1 видно, что в исторический период (1976–2005 гг.) медиана количе-

ства АО над Чёрным морем в декабре по данным РКМ меньше на 8%, а ширина её доверительного интервала больше в 1,5 раза, чем по данным ре-анализа. По данным ERA5 в исторический период отмечается уменьшение количества АО над Чёрным морем в декабре для квантилей от 0,1 до 0,6 и рост количества АО для квантиля 0,9. По данным РКМ в указанный период выявлено уменьшение количества АО для квантилей от 0,1 до 0,5 и увеличение количества АО для квантилей от 0,6 до 0,9. При этом для квантилей 0,3, 0,5 и 0,9 коэффициенты трендов в рассматриваемый период почти совпадают. Таким образом, медиана и долгопериодные тенденции изменения количества АО над Чёрным морем в декабре за исторический период по используемым данным хорошо согласованы. Это даёт основания детально рассматривать изменение медианы и долгопериодные тенденции количества АО, ожидаемых в будущие периоды при разных сценариях изменения концентрации парниковых газов в атмосфере для Чёрного моря (табл. 1 и рис. 2) и Черноморского региона (рис. 3) по данным выбранной РКМ.

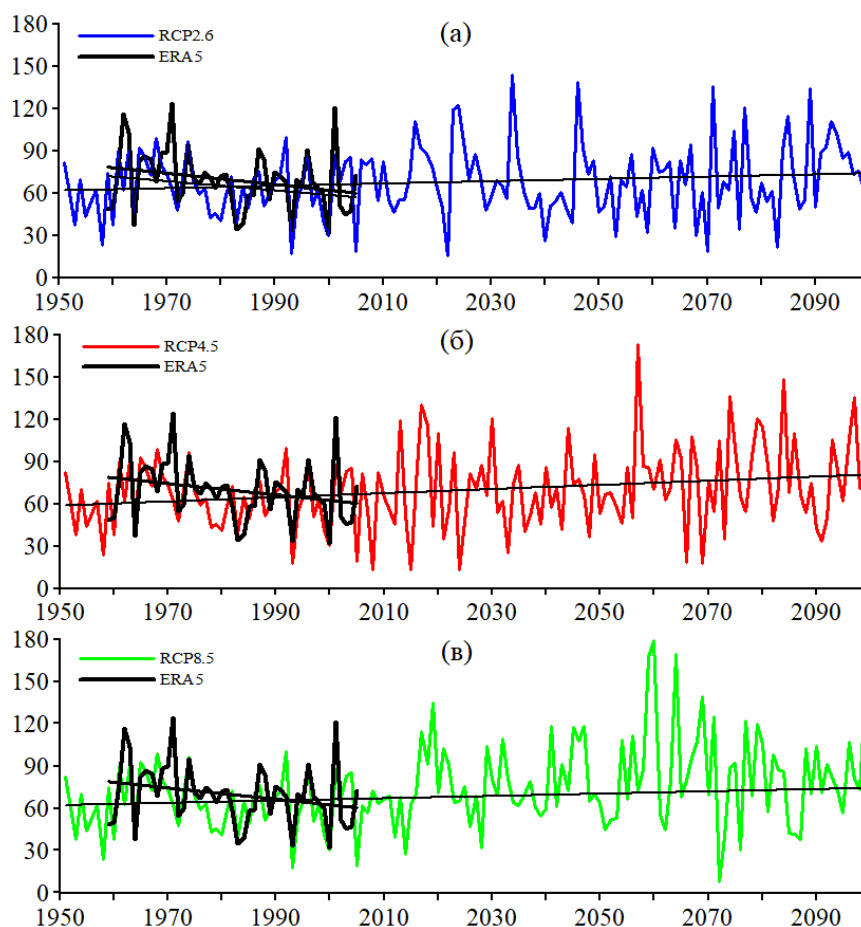


Рис. 2. Временные ряды количества атмосферных осадков (мм/месяц) над Чёрным морем в декабре по данным ре-анализа ERA5 в период 1959–2005 гг. и региональной климатической модели SMHI-RCA4 в период 1951–2099 гг. при разных сценариях изменения концентрации парниковых газов RCP2.6 (а), RCP4.5 (б) и RCP8.5 (в). Прямые черные линии – медианные тренды (для значения квантиля 0,5)

Fig. 2. Time series of the amount of precipitation (mm/month) over the Black Sea in December, based on ERA5 re-analysis data for the period 1959–2005 and the regional climate model SMHI-RCA4 for the period 1951–2099 under different scenarios of changes in greenhouse gas concentration RCP2.6 (a), RCP4.5 (b) and RCP8.5 (c). Straight black lines are median trends (for a quantile value of 0.5)

Анализ проекций количества АО в декабре к середине и к 80 гг. XXI века показал следующее. В краткосрочной перспективе (2021–2050 гг.) при переходе от сценария RCP2.6 к более пессимистичному сценарию RCP8.5 (т. е. при росте концентрации парниковых газов в атмосфере) медиана количества АО по данным РКМ увеличивается на 16%, а ширина её доверительного интервала уменьшается от 37 мм/мес для RCP2.6 до 27 мм/мес для RCP8.5. При любом из сценариев изменения концентрации парниковых газов в атмосфере медиана количества АО над Чёрным морем в ука-

занный период будет находиться в пределах доверительного интервала, оцененного для исторического периода.

В краткосрочной перспективе для сценария RCP2.6 коэффициенты квантильного тренда для величин количества АО над Чёрным морем в декабре отрицательны во всем диапазоне квантилей. При этом уменьшение количества АО для квантилей 0,5 и 0,9 значительно на 99% доверительном уровне. При умеренно оптимистичном сценарии RCP4.5 коэффициенты квантильного тренда количества АО для квантилей 0,1–0,6 преимущественно положительны. Причем эта

величина для квантиля 0,1 значима на 99% доверительном уровне. Согласно пессимистичному сценарию RCP8.5, в указанный период значимых тенденций изменения количества АО для низких и

средних квантилей не обнаружено. Для квантилей 0,7–0,9 отмечаются положительные коэффициенты квантильного тренда, но значимые на 99% доверительном уровне только для квантиля 0,8.

Таблица 1. Медиана количества атмосферных осадков (мм/месяц) над Чёрным морем в декабре, её доверительный интервал на уровне 99% и коэффициенты квантильного тренда (мм/месяц / год) в исторический и будущие периоды при разных сценариях изменения концентрации парниковых газов в атмосфере

	1976–2005 гг.		2021–2050 гг.			2051–2080 гг.		
	ERA5	SMHI-RCA4	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
медиана	66,2	61,5	61,1	66,3	70,3	65,2	80,7	83,6
доверительный интервал для медианы на уровне 99%	58,2-72,8	49,3-71,8	50,5-87,0	51,5-81,8	64,0-90,8	49,4-82,9	62,4-99,7	66,0-111,6
значение квантиля	Коэффициент квантильного тренда, мм/мес / год							
0,9	<i>0,80</i>	<i>0,80</i>	-1,34	-0,07	0,69	1,67	1,00	-2,07
0,8	0,11	0,80	-0,56	-0,16	1,12	1,37	1,52	0,49
0,7	-0,01	0,88	-0,66	0,02	0,36	0,49	1,28	0,43
0,6	-0,17	0,67	-0,76	0,51	-0,28	-0,11	1,65	0,84
0,5	<i>-0,45</i>	<i>-0,48</i>	-1,04	0,74	-0,03	-0,39	1,08	1,11
0,4	-0,62	-0,93	-0,94	0,11	-0,17	-0,13	0,60	1,15
0,3	<i>-0,63</i>	<i>-0,60</i>	-0,41	0,35	-0,02	-0,06	0,22	0,98
0,2	-0,72	-0,07	-0,12	0,56	-0,10	0,65	0,04	0,53
0,1	-0,41	-0,81	-0,44	1,48	0,56	0,26	-0,61	-0,77

Примечание. Курсивом выделены коэффициенты квантильного тренда, совпадающие между данными re-анализа ERA5 и РКМ SMHI-RCA4. Жирным шрифтом выделены коэффициенты квантильного тренда, значимые на 99% доверительном уровне.

В среднесрочной перспективе (2051–2080 гг.) дальнейший рост концентрации парниковых газов в атмосфере (т. е. при переходе от сценария RCP2.6 к более пессимистичному сценарию RCP8.5) будет сопровождаться увеличением на 28% медианы количества декабрьских АО над Чёрным морем. В указанный период ширина доверительного интервала медианы количества АО увеличивается от 33 мм/мес для RCP2.6 до 45 мм/мес для RCP8.5, т. е. почти в 1,5 раза.

В период 2051–2080 гг. для сценария RCP2.6 значимые тенденции изменения количества АО над Чёрным морем для квантилей 0,1–0,7 не обнаружены. Для квантилей 0,8 и 0,9 получены значимые (на 99% уровне) положительные тенденции. При умеренно оптимистичном сценарии RCP4.5 коэффициенты квантильного тренда количества АО для кванти-

лей 0,1–0,4 незначимы. Для квантилей 0,5–0,9 отмечаются значимые (на 99% уровне) положительные тенденции. Согласно пессимистичному сценарию RCP8.5 в указанный период коэффициенты квантильного тренда количества АО для квантилей 0,1 и 0,9 отрицательны. Причем коэффициенты квантильного тренда для квантиля 0,9 значимы (на 99% уровне). При этом они оказались и наибольшими (по абсолютной величине) по сравнению с остальными коэффициентами. Вместе с тем для квантилей 0,4 и 0,5 получены значимые (на 99% уровне) положительные коэффициенты квантильного тренда количества АО.

Перейдем к рассмотрению изменения медианы количества декабрьских АО в Черноморском регионе в будущие периоды по отношению к историческому периоду (рис. 3).

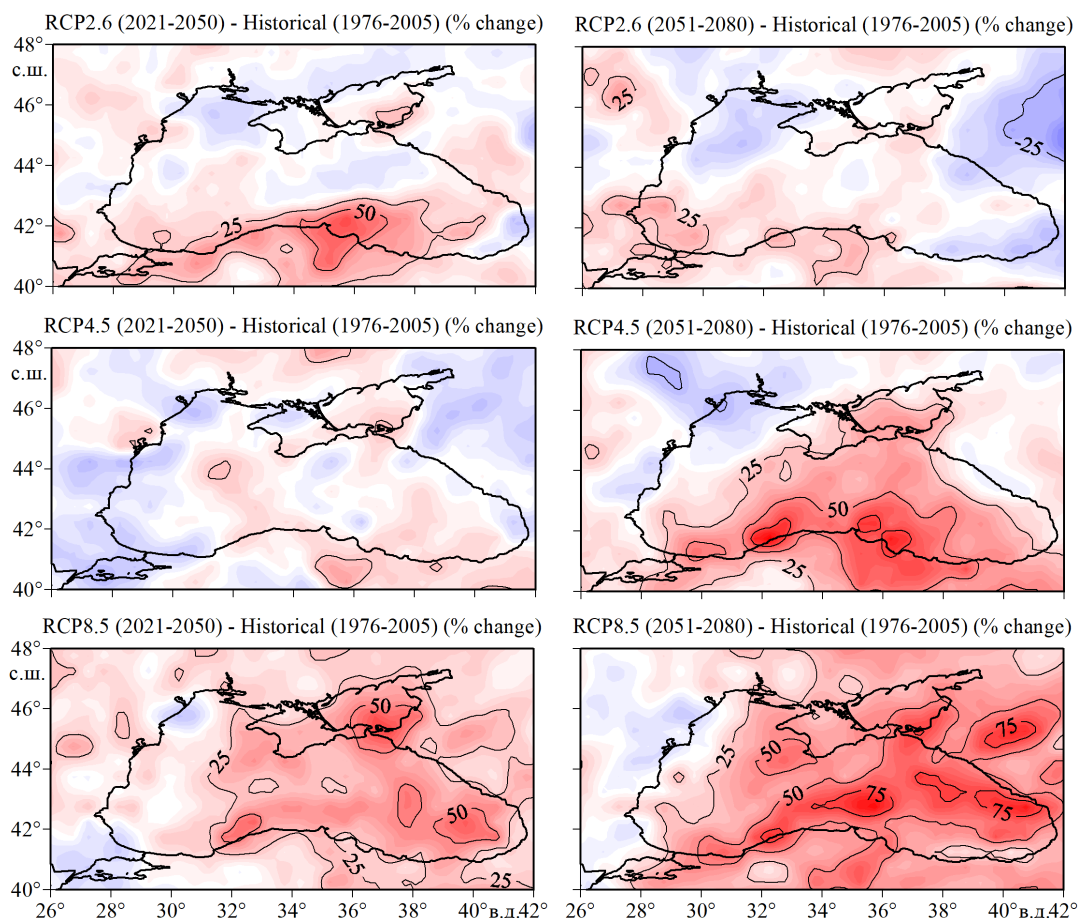


Рис. 3. Изменение медианы количества атмосферных осадков (%) в 2021–2050 гг. (слева) и в 2051–2080 гг. (справа) по отношению к историческому периоду 1976–2005 гг. в Черноморском регионе в декабре при разных сценариях изменения концентрации парниковых газов RCP2.6 (вверху), RCP4.5 (посередине) и RCP8.5 (внизу). Показаны изолинии ± 25 , 50 и 75%
Fig. 3. Change in median precipitation (%) in 2021–2050 (left) and in 2051–2080 (right) in relation to the historical period 1976–2005 in the Black Sea region in December under different scenarios of changes in greenhouse gas concentration RCP2.6 (top), RCP4.5 (middle) and RCP8.5 (bottom). Isolines of ± 25 , 50 and 75% are shown

В краткосрочной перспективе (2021–2050 гг.) по отношению к историческому периоду для сценария RCP2.6 медиана количества АО значительно увеличивается на 25–50% вдоль Анатолийского побережья. На остальной части Черноморского региона изменения медианы количества АО малы и различны по знаку. В рассматриваемый период для умеренно оптимистичного сценария RCP4.5 значимое (на 95% уровне) увеличение количества АО отмечается на небольшой по площади области Черноморского региона по отношению к историческому периоду. На юго-западе и северо-востоке рассматриваемого региона получено не-

значимое уменьшение количества АО. Количество АО на территории Крымского полуострова незначимо уменьшается в северо-западной части и увеличивается в юго-восточной части. Для пессимистичного сценария RCP8.5 в указанный период медиана количества АО увеличивается почти во всем Черноморском регионе по отношению к историческому периоду, за исключением малых областей в северо-западной и юго-западной частях Чёрного моря. Наибольший рост (свыше 50%) медианы количества АО отмечается в окрестности Керченского пролива, юго-восточной части Чёрного моря и вдоль Анатолийского побережья.

В среднесрочной перспективе (2051–2080 гг.) по отношению к историческому периоду для сценария RCP2.6 отмечается значимое на 95% уровне уменьшение медианы количества АО на северо-востоке и значимое увеличение изучаемого параметра в малых по площади областях на юге, юго-западе и северо-западе Черноморского региона. В этот период для умеренно оптимистичного сценария RCP4.5 получен значимый рост медианы количества АО в центральной и южной части Черноморского региона по отношению к историческому периоду. Наибольшее увеличение медианы количества АО (свыше 50%) обнаружено вдоль Анатолийского побережья. При этом в северо-западной части рассматриваемого региона расположена область значимого уменьшения медианы количества АО. Для пессимистичного сценария RCP8.5 в указанный период почти вся территория Черноморского региона к востоку от 30° в. д. характеризуется значимым ростом медианы количества АО по отношению к историческому периоду. В нескольких небольших по площади областях увеличение медианы количества АО составит более 75% от её значений в историческом периоде. При этом в восточной части Черноморского региона отмечается незначимое уменьшение медианы количества АО.

Какой из рассмотренных сценариев более вероятен? С учётом принятых на сегодняшний день законодательных актов в странах-эмитентах парниковых газов, ответственных за не менее чем 75% общих выбросов, таковым сценарием является RCP4.5 [19].

Заключение. Проанализированы численные оценки изменения количества АО в декабре для Черноморского региона в XXI веке с использованием РКМ SMHI-RCA4 и входных данных ГКМ ICNES-EC-EARTH (член ансамбля ГКМ r12i1p1). РКМ SMHI-RCA4 адекватно воспроизводит медиану и долгосрочные тенденции изменения количества АО над Чёрным морем в исторический период (1976–2005 гг.), полученные по данным ре-анализа ERA5. Рассмотрено изменение модельных месячных сумм

АО в будущем (2021–2050 гг. и 2051–2080 гг.) по отношению к историческому периоду при разных климатических сценариях. Получены следующие основные результаты.

Для сценария RCP2.6 в краткосрочной перспективе (2021–2050 гг.) отмечается значимое уменьшение общего количества АО над Чёрным морем для квантилей 0,5 и 0,9. В тоже время медиана количества АО, выпадающих вдоль Анатолийского побережья, увеличивается на 25–50% по отношению к историческому периоду. В среднесрочной перспективе (2051–2080 гг.) для квантилей 0,8–0,9 получены значимые положительные тенденции. В тоже время ожидается значимое уменьшение (по отношению к историческому периоду) медианы количества АО на северо-востоке Черноморского региона.

Для умеренно оптимистичного и более вероятного из рассмотренных сценариев (RCP4.5) в краткосрочной перспективе отмечается значимое увеличение количества АО над Чёрным морем для квантиля 0,1. В этот период области значимого увеличения медианы количества АО в Черноморском регионе невелики по площади. В среднесрочной перспективе для квантилей 0,5–0,9 получены значимые положительные тенденции изменения общего количества АО над Чёрным морем. В указанный период ожидается значимый рост (по отношению к историческому периоду) медианы количества АО в центральной и южной частях Черноморского региона. Наибольшее увеличение медианы количества АО (свыше 50%) получено вдоль Анатолийского побережья. Вместе с тем, в северо-западной части рассматриваемого региона расположена область значимого уменьшения (более 25%) медианы количества АО.

Для пессимистичного сценария RCP8.5 в краткосрочной перспективе получено значимое увеличение количества АО над Чёрным морем для квантиля 0,8. В этот период медиана количества АО увеличивается по отношению к историческому периоду почти во всём Черноморском регионе, за исключением

малых по площади областей в северо-западной и юго-западной частях Чёрного моря. Наибольший рост (свыше 50%) медианы количества АО отмечается в окрестности Керченского пролива, юго-восточной части Чёрного моря и вдоль Анатолийского побережья. В среднесрочной перспективе ожидается значимое увеличение количества АО для диапазона квантилей 0,4–0,5 и значимое уменьшение количества АО для квантиля 0,9. В указанный период почти вся территория Черноморского региона к востоку от 30° в. д. характеризуется значимым ростом медианы количества АО. В нескольких небольших по площади областях увеличение медианы количества АО составит более 75% по сравнению с историческим периодом.

Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные рекомендации, позволившие улучшить первый вариант статьи.

Работа выполнена в рамках госзадания ИПТС (№ госрегистрации 121122300074-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jacob D., Petersen J., Eggert B. et al. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research // *Regional environmental change*. 2014. Vol. 14. No. 2. P. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
2. IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Core Writing Team. Pachauri R.K., Meyer L.A. (Eds). Geneva, Switzerland, 151 p.
3. van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J. et al. RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C // *Climatic change*. 2011. Vol. 109. No. 95. P. 95–116. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>
4. Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. et al. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100 // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109. No. 77. P. 77–94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
5. Riahi K., Rao S., Krey V. et al. RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions // *Climatic Change*. 2011. Vol. 109. No. 33. P. 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
6. Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs // *Journal of Water and Climate Change*. 2016. Vol. 7. No. 1. P. 103–113. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.081>
7. Алешина М.А., Семенов В.А. Изменения характеристик осадков на территории России в XX–XXI вв. по данным ансамбля моделей CMIP6 // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 4. С. 424–440. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-424-440>
8. Справочник по климату Черного моря. М.: Гидрометеиздат, 1974. 406 с.
9. Торопов П.А., Алешина М.А., Семенов В.А. Тенденции изменений климата Черноморско-Каспийского региона за последние 30 лет // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2018. № 2. С. 67–77.
10. Анисимов А.Е., Ефимов В.В. Численные оценки изменения осадков в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. 2012. № 6. С. 45–58.
11. Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е. Моделирование изменений климата в Черноморском регионе в XXI столетии // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 2 (182). С. 3–14.
12. Ефимов В.В., Володин Е.М., Анисимов А.Е., Барабанов В.С. Региональные проекции изменений климата в Черноморско-Каспийском регионе в конце XXI столетия // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 5 (185). С. 53–72.
13. Полонский А.Б., Суханос П.А. Расчёт климатических характеристик осадков над Чёрным морем по данным региональных климатических моделей //

Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 3 (389). С. 59–74. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-59-74>

14. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Чёрное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 430 с.

15. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. No. 730. P. 1999–2049 <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

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

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

18. *Киктев Д.Б., Крыжов В.Н.* О сравнении различных методов оценки статистической значимости линейных трендов // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 11. С. 27–38.

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

TRENDS IN CHANGES IN WINTER PRECIPITATION IN THE BLACK SEA REGION IN THE XXI CENTURY UNDER DIFFERENT CLIMATE SCENARIOS

A.B. Polonsky, P.A. Sukhonos

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

Based on the calculations of the regional climate model SMHI-RCA4 within the framework of the CORDEX project, projections of changes in winter precipitation for the Black Sea region in the 21st century are obtained under different climate scenarios. Changes in the precipitation value in December are considered in the short-term (2021–2050) and medium-term (2051–2080) perspectives in relation to the historical period (1976–2005). In the second half of the 21st century, for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios there is a significant increase in the median precipitation almost over the entire territory of the Black Sea region.

Keywords: precipitation, projections, regional climate model SMHI-RCA4, climate scenarios, Black Sea

REFERENCES

1. *Jacob D., Petersen J., Eggert B. et al.* EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 2014, Vol. 14, No. 2, pp. 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

2. IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report, 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Core Writing Team. Pachauri R.K., Meyer L.A. (Eds). Geneva, Switzerland, 151 p.

3. *van Vuuren D.P., Stehfest E., den Elzen M.G.J. et al.* RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 °C. *Climatic change*, 2011, Vol. 109, No. 95, pp. 95–116. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>

4. *Thomson A.M., Calvin K.V., Smith S.J. et al.* RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*, 2011, Vol. 109, No. 77, pp. 77–94.

5. *Riahi K., Rao S., Krey V. et al.* RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 2011, Vol. 109, No. 33, pp. 33–57.

6. Basharin D., Polonsky A., and Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, Vol. 7, No. 1, pp. 103–113. <https://doi.org/10.2166/wcc.2015.081>
7. Aleshina M.A. and 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 and applied climatology*, 2022, Vol. 8, No. 4, pp. 424–440. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-4-424-440>
8. Spravochnik po klimatu Chernogo morya (Guidebook on the climate of the Black Sea), Moscow: Gidrometeoizdat, 1974, 406 p.
9. Toropov P.A., Aleshina M.A., and Semenov V.A. Tendentsii izmeneniy klimata Chernomorsko–Kaspiyskogo regiona za posledniye 30 let (Trends of climate change in the Black Sea–Caspian Sea region during recent 30 years). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*, 2018, No. 2, pp. 67–77.
10. Anisimov A.Ye. and Yefimov V.V. Chislennyye otsenki izmeneniya osadkov v Chernomorskom regione v XXI stoletii (Numerical estimates of changes in precipitation in the Black Sea region in the 21st century). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2012, No. 6, pp. 45–58.
11. Yefimov V.V., Volodin Ye.M., and Anisimov A.Ye. Modelirovaniye izmeneniy klimata v Chernomorskom regione v XXI stoletii (Modeling of climate change in the Black Sea region in the 21st century). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, No. 2 (182), pp. 3–14.
12. Yefimov V.V., Volodin Ye.M., Anisimov A.Ye., and Barabanov V.S. Regional'nyye proyeksii izmeneniy klimata v Chernomorsko–Kaspiyskom regione v kontse XXI stoletiya (Regional projections of climate change in the Black Sea–Caspian region at the end of the 21st century). *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, No. 5 (185), pp. 53–72.
13. Polonskiy A.B. and Sukhonos P.A. Raschot klimaticheskikh kharakteristik osadkov nad Chornym morem po dannym regional'nykh klimaticheskikh modelei (Simulation of climatic characteristics of precipitation over the Black Sea with the data of regional climate models). *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy*, 2023, No. 3 (389), pp. 59–74. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-59-74>
14. 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, 1991, 430 p.
15. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, Vol. 146, No. 730, pp. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
16. Timofeev A.A. and Sterin A.M. Primeneniye metoda kvantil'noy regressii dlya analiza izmeneniy kharakteristik klimata (Using the quantile regression method to analyze changes in climate characteristics). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2010, No. 5, pp. 27–41.
17. Koener R. Quantile Regression. *Econometric Society Monographs*. Cambridge, 2005, 349 p.
18. Kiktev D.B. and Kryzhov V.N. O sravnenii razlichnykh metodov otsenki statisticheskoy znachimosti lineynykh trendov (Comparison of several methods of assessment of statistical significance of linear trends). *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, No. 11, pp. 27–38.
19. Pekarnikova M.E. and Polonskiy A.B. Analiz realistichnosti dostizheniya osnovnoy tseli Parizhskogo soglasheniya pri sushchestvuyushchey sisteme pravovogo regulirovaniya i kontrolya za antropogennymi vybrosami parnikovyykh gazov (Analysis of the realism of achieving the main goal of the Paris agreement under the existing system of legal regulation and control of anthropogenic emissions of greenhouse gases). *Fundamental and applied climatology*, 2022, Vol. 8, No. 2, pp. 190–208