

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-59-74>

УДК 551.515.4

## **Расчет климатических характеристик осадков над Черным морем по данным региональных климатических моделей**

*А.Б. Полонский, П.А. Сухонос*

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

Оценивается способность 16 региональных климатических моделей (ПКМ) из исследовательской программы Coordinated Regional Downscaling Experiment (проект CORDEX) адекватно воспроизводить средние величины и долгосрочные тенденции изменений количества атмосферных осадков, выпадающих над Черным морем. Результаты расчетов, выполненных с помощью ПКМ, сопоставляются с данными реанализа ERA5 за контрольный период (1959–2005 гг.). Проанализированы величины среднегодового и среднесезонного для зимы и лета количества осадков, а также долгосрочные тенденции их изменения во все месяцы в широком диапазоне квантилей. Получено, что среднесезонное количество осадков, выпадающих над Черным морем, в зимний сезон удовлетворительно воспроизводится большинством ПКМ, а в летний сезон – всего шестью ПКМ. При этом ежемесячные тренды осадков, оцененные на основании прогностических расчетов, близки к аналогичным трендам, полученным по данным ERA5, только для одной ПКМ.

*Ключевые слова:* атмосферные осадки, квантильная регрессия, Черное море, CORDEX

## **Simulation of climatic characteristics of precipitation over the Black Sea with the data of regional climate models**

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

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

The ability of 16 regional climate models (RCMs) from the CORDEX project to adequately simulate the average values and long-term trends in precipitation over the Black Sea is assessed. The results of the simulations performed using the RCMs are compared with the data of the ERA5 reanalysis for the control period (1959–2005). Average annual precipitation and average seasonal precipitation for winter and summer, as well as long-term trends in precipitation for all months in a wide range of quantiles, are analyzed. It was found that average seasonal precipitation over the Black Sea is satisfactorily simulated by most RCMs in winter and by six RCMs in summer. At the same time, the monthly precipitation trends estimated on the basis of forecast calculations are close to those based on the ERA5 data only for one RCM.

*Keywords:* precipitation, quantile regression, Black Sea, CORDEX

## Введение

Атмосферные осадки (АО) являются одним из ключевых факторов, влияющих на изменения гидролого-гидрохимического режима Черного моря [1, 2, 6, 8]. К сожалению, получение достоверных климатических оценок количества АО, выпадающих на поверхность Черного моря, затруднено из-за отсутствия длительных инструментальных гидрометеорологических наблюдений за АО на акватории моря. Это приводит к труднопреодолимым проблемам при проверке адекватности прогностических моделей, пригодных для диагноза изменчивости АО над Черным морем, и получения достоверных региональных климатических проекций.

Среднемесячные и среднегодовые карты сумм АО, построенные по данным многолетних береговых наблюдений и эпизодических судовых измерений АО, приведены в [2]. По данным, приведенным в этой работе, среднемноголетнее количество АО, выпадающих над Черным морем, составило 571 мм/год (за период 1923–1988 гг., исключая 1941–1944 гг.). Авторы работы [8] получили аналогичную оценку по данным за период 1923–2002 гг. (с разрывом в 1941–1944 гг.), которая оказалась равной 560 мм/год. Климатическая изменчивость количества АО, выпадающих над Черным морем, по 82-летнему ряду месячных и годовых величин, рассчитанных по методу модульных коэффициентов и по данным береговых станций продолжительностью около 100 лет, проанализирована в [5]. Показано, что до 2005 г. включительно среднее многолетнее количество АО, выпадающих на акваторию моря, составляло 590 мм/год. С учетом предлагаемой в этой работе поправки в 20 % средняя многолетняя величина АО за период 1923–2005 гг. увеличится приблизительно до 700 мм/год.

Оценки среднемноголетней величины АО, выпадающих на акваторию Черного моря, полученные с использованием регулярных спутниковых измерений и по данным атмосферных реанализов, также достаточно противоречивы. Так, количество АО, выпадающих над Черным морем, за период 1988–2006 гг., оцененное по массиву HOAPS-3, основанному на спутниковых данных, составляет 475 мм/год, а по данным атмосферных реанализов NCEP, ERA-40 и ERA-Interim за этот же период равно 658 мм/год, 454 мм/год и 490 мм/год соответственно [16].

В принципе, пересчет данных реанализа с низким пространственным разрешением на сетку с более высоким разрешением с помощью региональных климатических моделей (РКМ) позволяет существенно уточнить приведенные выше оценки. Результаты регионального численного моделирования при помощи модели PRECIS с входными данными из реанализа ERA-40 за период 1958–2001 гг. (региональной модели PRECIS с входными данными из реанализа ERA-Interim за период 1990–2001 гг., а также региональной модели RegCM с входными данными из реанализа ERA-Interim за период 1980–2013 гг.) позволили получить количество АО, выпадающих над Черным морем, равное, соответственно, 564 мм/год, 528 мм/год и 475 мм/год [9]. Однако использование РКМ с различной

параметризацией облачности и осадков в отсутствие долговременных инструментальных наблюдений за АО над акваторией моря делает затруднительным установление наиболее адекватного варианта регионального моделирования.

Что касается долгопериодных тенденций изменения количества АО, то рост количества АО, выпадающих над Черным морем, с 510 мм/год в 1923–1926 гг. до 570 мм/год к 1998 г., позволил авторам работы [8] оценить коэффициент линейного тренда АО в 0,88 мм/год / год. По оценкам, опубликованным в [5], во временных изменениях годовых величин АО над Черным морем также отмечается значимый положительный тренд с угловым коэффициентом 1,9 мм/год / год. Напротив, по данным спутниковых наблюдений из массива HOAPS-3 за период 1988–2006 гг. линейный тренд количества АО, выпадающих над Черным морем, отрицателен с коэффициентом -7,3 мм/год / год, но значим на доверительном уровне 95 % только на 5 % площади акватории [16].

Таким образом, различия оценок среднего количества АО, выпадающих над Черным морем, и долгопериодных тенденций их изменения очень велики и варьируют вплоть до знака оцениваемых трендов. Причем в разных работах эти оценки рассчитываются по данным из разных источников и за разные временные периоды. При условии наличия высокоамплитудных междесятилетних вариаций гидрометеорологических параметров в Черноморском регионе (включая АО) изменение периода, по которому оценивается линейный тренд, само по себе может приводить к смене знака оцениваемого тренда [15].

Необходимо отметить, что процесс осадкообразования характеризуется сильной пространственной перемежаемостью, что приводит к возникновению большой дисперсии оценок средних по площади величин и большим различиям величин АО в близлежащих точках пространства. Нестационарный характер процесса выпадения АО и их сложная пространственно-временная изменчивость приводят к тому, что величины количества АО характеризуют случайный процесс, существенно отличный от простого гауссовского процесса [4]. Поэтому в данной работе основное внимание будет уделено оценке медианных значений количества АО и долгопериодных тенденций их изменения во все месяцы в широком диапазоне квантилей.

В связи с отмеченными выше обстоятельствами, выбор того или иного варианта РКМ для оценки климатических характеристик АО, выпадающих над акваторией Черного моря, и их изменения в будущем с использованием различных климатических сценариев представляет собой нетривиальную задачу. Применение ансамблевого усреднения, широко используемого при сценарных оценках, далеко не всегда представляется целесообразным, особенно при анализе региональных изменений количества АО. Как показано в ряде работ (см., например, [3, 11]), из всего набора доступных РКМ лучше отобрать лишь те из них, которые более точно описывают климатические

характеристики АО, известные из данных наблюдений. Ошибки в моделировании средних величин и климатических тенденций изменения АО могут привести к слишком большому разбросу ансамбля проекций РКМ и неопределенности будущих пространственно-временных характеристик АО в Черноморском регионе. Поэтому цель данной работы состоит в анализе способности РКМ из исследовательской программы Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) адекватно воспроизводить средние величины и долгопериодные тенденции изменения количества АО, выпадающих на поверхность Черного моря, за контрольный период (1959–2005 гг.). Результаты регионального моделирования за этот период сопоставляются с данными одного из самых современных атмосферных реанализов – ERA5, которые в свою очередь сравниваются с данными наблюдений.

### Используемые данные и методы их обработки

Использованы среднемесячные величины количества АО по данным 16 РКМ исследовательской программы CORDEX [13]. Данные имеются в свободном доступе на сайте Climate Explorer (<https://climexp.knmi.nl/>). Модельные расчеты выполнены с использованием различных сочетаний базовых глобальных моделей с грубым разрешением и РКМ, реализующих динамический даунскейлинг. Данные РКМ имеют пространственное разрешение  $0,5 \times 0,5^\circ$  по территории Европейского региона ( $27,75\text{--}72,25^\circ$  с. ш.,  $24,75^\circ$  з. д. –  $44,75^\circ$  в. д.) и охватывают период 1951–2099 гг. Для сравнения с модельными расчетами величин количества АО использовались среднемесячные данные реанализа ERA5 с пространственным разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  за период 1959–2020 гг. [12]. Исходные величины количества АО по данным РКМ и реанализа имеют размерность  $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$  и для удобства сравнения были преобразованы в эквивалентные мм/месяц и мм/год. Использовались данные численных экспериментов и реанализа за контрольный период 1959–2005 гг. для акватории Черного моря ( $40\text{--}48^\circ$  с. ш.,  $26\text{--}42^\circ$  в. д.). С целью облегчения идентификации конкретного численного эксперимента в рамках проекта CORDEX в таблице приводится трехзначный шифр каждого численного эксперимента, проведенного с помощью РКМ с входными данными от определенного члена ансамбля реализаций глобальных климатических моделей (ГКМ).

Для оценки качества воспроизведения величин количества АО в реанализе ERA5 использованы суточные данные инструментальных наблюдений, взятые из базы данных European Climate Assessment & Dataset (E-OBS) (v. 27.0e) (<https://climexp.knmi.nl/>). Массив E-OBS основан на материалах инструментальных наблюдений национальных метеослужб, интерполированных на сетку с разрешением  $0,25 \times 0,25^\circ$  для Европейского региона за период 1950–2019 гг. Эти данные показывают количество АО только над сушей и для анализа были преобразованы в ежемесячные данные.

**Таблица.** Список использованных численных экспериментов, проведенных с помощью региональных климатических моделей в рамках исследовательской программы CORDEX с различными входными данными из ансамбля реализаций глобальных климатических моделей

**Table.** List of used numerical experiments conducted using regional climate models within the framework of the CORDEX research program with various input data from an ensemble of implementations of global climate models

| Шифр числен. эксперимента | Региональная климатическая модель | Глобальная климатическая модель | Член ансамбля глобальной климатич. модели |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------|
| 000                       | CNRM-ALADIN53                     | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5           | r1i1p1                                    |
| 001                       | DMI-HIRHAM5                       | ICHEC-EC-EARTH                  | r3i1p1                                    |
| 002                       | KNMI-RACMO22E                     | ICHEC-EC-EARTH                  | r1i1p1                                    |
| 003                       | KNMI-RACMO22E                     | MOHC-HadGEM2-ES                 | r1i1p1                                    |
| 004                       | MPI-CSC-REMO2009                  | MPI-M-MPI-ESM-LR                | r1i1p1                                    |
| 005                       | MPI-CSC-REMO2009                  | MPI-M-MPI-ESM-LR                | r2i1p1                                    |
| 006                       | SMHI-RCA4                         | CCCma-CanESM2                   | r1i1p1                                    |
| 007                       | SMHI-RCA4                         | CNRM-CERFACS-CNRM-CM5           | r1i1p1                                    |
| 008                       | SMHI-RCA4                         | CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0       | r1i1p1                                    |
| 009                       | SMHI-RCA4                         | ICHEC-EC-EARTH                  | r12i1p1                                   |
| 010                       | SMHI-RCA4                         | IPSL-IPSL-CM5A-MR               | r1i1p1                                    |
| 011                       | SMHI-RCA4                         | MIROC-MIROC5                    | r1i1p1                                    |
| 012                       | SMHI-RCA4                         | MOHC-HadGEM2-ES                 | r1i1p1                                    |
| 013                       | SMHI-RCA4                         | MPI-M-MPI-ESM-LR                | r1i1p1                                    |
| 014                       | SMHI-RCA4                         | NCC-NorESM1-M                   | r1i1p1                                    |
| 015                       | SMHI-RCA4                         | NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M            | r1i1p1                                    |

Были выбраны четыре узла сетки, образующие трапецию, в Северном Крыму (координаты: 45,875° с. ш., 34,125° в. д.; 45,875° с. ш., 34,375° в. д.; 45,625° с. ш., 34,125° в. д.; 45,625° с. ш., 34,375° в. д.). Этот район был выбран, поскольку он представляет собой относительно однородный в пространстве степной ландшафт. Такие особенности подстилающей поверхности, как, например, Крымские горы, недостаточно хорошо описываются моделями с пространственным разрешением в несколько десятков километров. В тоже время они не оказывают существенного влияния на климатические величины АО, выпадающих над акваторией Черного моря. Поскольку рассматриваемая характеристика не является нормально распределенной, то между временными рядами, полученными в узлах

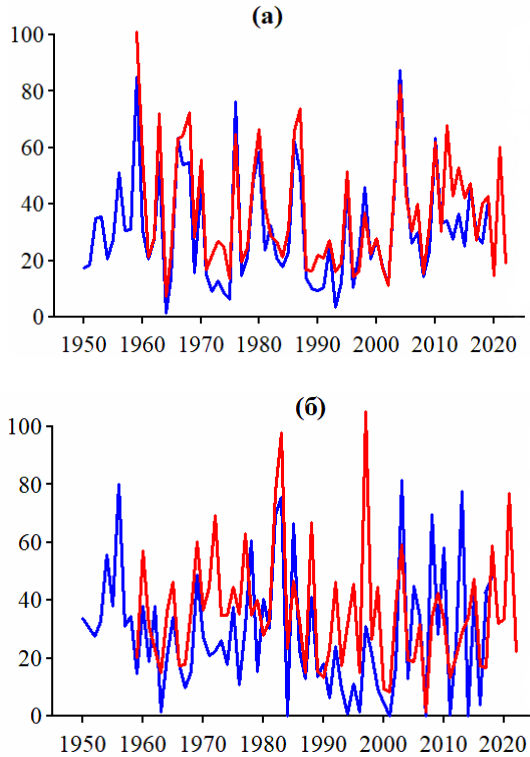
сетки с совпадающими координатами, рассчитаны коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для каждого месяца и среднегодовых величин за период 1959–2019 гг.

По исходным данным о количестве АО для каждой РКМ и реанализа ERA5 рассчитаны величины среднегодового количества АО и среднесезонного количества АО для зимы (декабрь–февраль) и лета (июнь–август), а также их максимальные и минимальные величины, медиана и ее доверительный интервал.

В качестве количественного показателя долгопериодных тенденций использованы оценки трендов величин количества АО, основанные на методе квантильной регрессии [7, 14]. Преимущества этого метода для анализа тенденций изменения количества АО обсуждаются в [10]. В данной работе расчеты проводились отдельно по каждому массиву данных для 9 значений квантилей: от 0,1 с шагом 0,1 до 0,9 включительно для каждого месяца года. Далее рассчитывалась разность между коэффициентами квантильных трендов, оцененных по каждой РКМ и по данным реанализа ERA5. Коэффициент линейного тренда по данным РКМ выше, чем по данным реанализа ERA5, если разность положительна, и наоборот. Если величина разности находится в пределах  $\pm 0,4$  мм/месяц / год, то принималось, что для данного месяца и значения квантиля долгопериодные тенденции изменения количества АО по данной РКМ и реанализу совпадают.

### Результаты и их анализ

Перед тем, как перейти к анализу качества РКМ, сравним величины количества АО, выпадающих в степной части Крыма, рассчитанных по двум типам данных за 61-летний период (1959–2019 гг.): полученным из реанализа ERA5 и из массива E-OBS. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между соответствующими величинами для зимних месяцев составляют  $\sim 0,85$ – $0,9$ , а для летних месяцев находятся в диапазоне  $\sim 0,55$ – $0,7$ . В качестве иллюстрации на рис. 1 показаны временные ряды количества АО из массивов E-OBS и ERA5 с наибольшим коэффициентом корреляции, равным  $0,92$  (рис. 1а) и с наименьшим коэффициентом корреляции, равным  $0,57$  (рис. 1б). Среднегодовые величины количества АО, полученные из этих массивов, за указанный период коррелированы с коэффициентами корреляции в диапазоне  $\sim 0,75$ – $0,80$ . Таким образом, в целом между реанализом ERA5 и данными инструментальных наблюдений из массива E-OBS отмечается высокое согласие, по крайней мере в зимний период и для степной части Крыма, т. е. области, расположенной на севере Черноморского региона. Отметим вместе с тем, что в летний период соответствующие коэффициенты корреляции существенно понижаются, несмотря на то, что инструментальные данные, доступные для территории Крыма, усваиваются в реанализе ERA5 и в этот сезон, что свидетельствует о худшей параметризации осадков конвективного типа в реанализе ERA5.

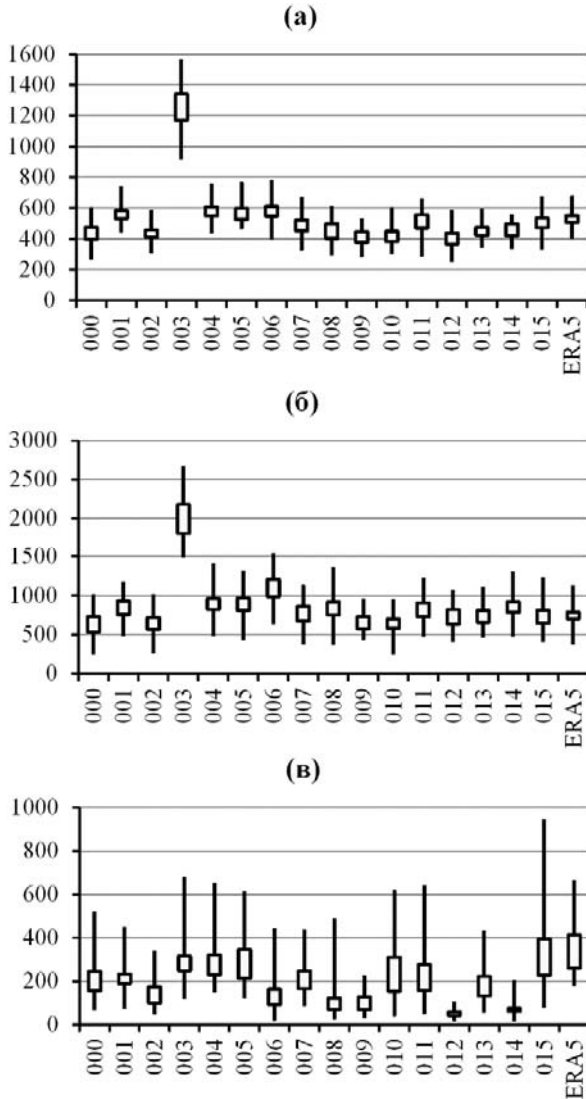


**Рис. 1.** Временные ряды количества АО (мм/месяц) из массива E-OBS (дано синим цветом) и реанализа ERA5 (дано красным цветом), выпадающих в Северном Крыму в январе в узле сетки с координатами  $45,875^{\circ}$  с.ш.,  $34,125^{\circ}$  в.д. (а) и в июле в узле сетки с координатами  $45,625^{\circ}$  с.ш.,  $34,125^{\circ}$  в.д. (б).

**Fig. 1.** Time series of the amount of precipitation (mm/month) from the E-OBS dataset (blue) and ERA5 re-analysis (red) over the Northern Crimea in January at the grid point with coordinates  $45,875^{\circ}$  N  $34,125^{\circ}$  E (a) and in July at the grid point with coordinates  $45,625^{\circ}$  N,  $34,125^{\circ}$  E (б).

По полученным результатам расчетов величин среднегодового количества АО и среднесезонного количества АО для зимы и лета были построены диаграммы, представленные на рис. 2. По горизонтальной оси на этих диаграммах отложены номера каждой РКМ из проекта CORDEX, приведенные в таблице, и реанализ ERA5. По вертикальной оси отображены значения в мм/год. Построенные таким образом диаграммы позволяют визуализировать особенности межмодельных различий и оценить согласие с данными о величинах количества АО из реанализа ERA5.

Минимальная величина среднегодовых АО, выпадающих над Черным морем, по данным реанализа ERA5 равна 401 мм/год, максимальная – 677 мм/год (рис. 2а).



**Рис. 2.** Величины (мм/год) среднегодового количества АО (а), среднесезонного количества АО для зимнего (б) и летнего (в) сезонов над Черным морем по данным РКМ из проекта CORDEX и реанализа ERA5 за период 1959–2005 гг.: вертикальные отрезки показывают диапазон от минимальной до максимальной величины, вертикальные размеры блоков соответствуют доверительному интервалу для медианы на уровне 99 %.

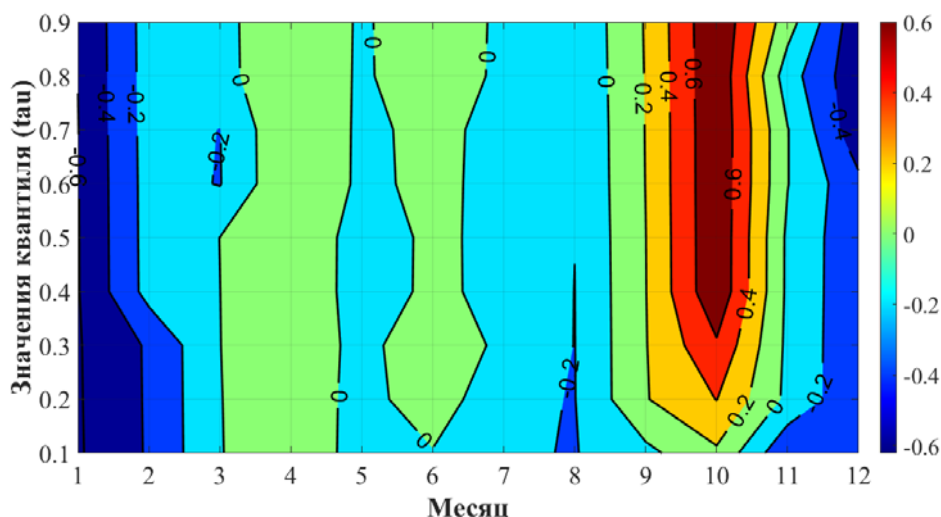
**Fig. 2.** Values (mm/year) of the average annual amount of precipitation (a), average seasonal amount of precipitation for the winter (б) and summer (в) over the Black Sea in the RCM data from the CORDEX project and the ERA5 re-analysis for the period 1959–2005: vertical segments show the range from the minimum to the maximum value, the vertical sizes of the blocks correspond to the confidence interval for the median at the level of 99 %.

Доверительный интервал медианы среднегодовых АО по этим данным составляет 508–551 мм/год. По литературным данным среднее значение количества АО, выпадающих над Черным морем, равно 528 мм/год [1]. Ширина доверительного интервала медианы среднегодовых АО по данным РКМ 008 и 011 в 2 раза, а по данным РКМ 003 – в 4 раза превышает соответствующую величину по данным реанализа ERA5. Разность между максимальными и минимальными значениями среднегодовых АО по данным реанализа ERA5 составляет 275 мм/год. Эта разность по данным РКМ, за исключением перечисленных выше, составляет от 80 % до 140 % по сравнению с данными реанализа.

Минимальная величина среднесезонного количества АО, выпадающих над Черным морем за зиму, по данным реанализа ERA5 равна 373 мм/год, максимальная – 1126 мм/год (рис. 2б). Доверительный интервал медианы на уровне 99 % для среднесезонного количества АО за зимний сезон по этим данным составляет 700–782 мм/год. Эта величина (82 мм/год) наименьшая по сравнению с соответствующей величиной по данным всех РКМ. Доверительный интервал медианы среднесезонного количества АО за зиму по данным РКМ 002, 004, 005, 009, 010, 013 и 014 не более чем в 2 раза, а по данным РКМ 003 – более чем в 4,5 раза превышает соответствующую величину по данным реанализа ERA5. РКМ 003 неадекватно воспроизводит АО над Черным морем в зимний сезон, завышая величины количества АО более чем в 2,5 раза. Это негативно сказывается на оценках среднегодовых величин количества АО по этой модели и на ансамблевой статистике. Осреднение по ансамблю моделей часто встречается при анализе мульти-модельных результатов. Такой подход предполагается более надежным при изучении климатических изменений. Однако он не всегда является наиболее благоприятным [3, 11]. Разность между максимальной и минимальной величинами среднесезонного количества АО для зимы по данным РКМ, за исключением РКМ 003, составляет от 70 % до 132 % по сравнению с данными реанализа ERA5.

В летний сезон отмечают наиболее сильные межмодельные различия в воспроизведении величин количества АО РКМ (рис. 2в). Минимальная величина среднесезонного количества АО за летний сезон по данным реанализа ERA5 равна 178 мм/год, максимальная – 665 мм/год. Доверительный интервал медианы на уровне 99 % для среднесезонного количества АО за летний сезон по этим данным составляет 260–413 мм/год. Верхняя граница указанного интервала у РКМ 000, 001, 002, 006, 007, 008, 009, 012, 013 и 014 ниже нижней границы соответствующего интервала для количества АО по данным реанализа ERA5. Эти РКМ неадекватно воспроизводят АО над Черным морем в летний сезон, занижая их величины в 3–6 раз. Величины среднесезонного количества АО за летний сезон по данным РКМ 003, 004, 005, 010, 011 и 015 находятся в более удовлетворительном согласии с соответствующими величинами по данным реанализа ERA5 по сравнению с остальными РКМ.

Рассмотрим далее квантильные тренды для величин количества АО над Черным морем по данным реанализа ERA5 в период 1959–2005 гг. (рис. 3) и их соответствие квантильным трендам, рассчитанным по данным каждой РКМ из проекта CORDEX (рис. 4). По данным реанализа ERA5 наиболее значительные тенденции уменьшения количества выпадающих АО отмечаются в зимний сезон. В зимние месяцы преобладают отрицательные тренды на всем диапазоне значений квантиля (коэффициенты менее  $-0,4$  мм/месяц / год). Вместе с тем в октябре по данным реанализа ERA5 отмечаются значительные тенденции увеличения количества выпадающих АО (коэффициенты более  $0,6$  мм/месяц / год), особенно интенсивных осадков (таким АО соответствуют высокие значения квантиля). В остальные месяцы значимых тенденций изменения количества выпадающих АО над Черным морем в рассматриваемый период не обнаружено.



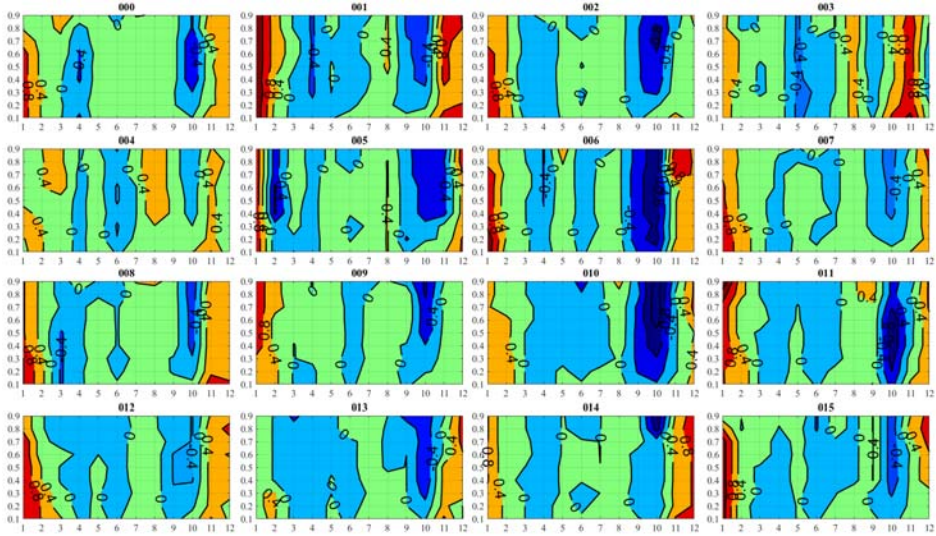
**Рис. 3.** График зависимости коэффициента линейной квантильной регрессии (мм/месяц / год) от значения квантиля, рассчитанного для величин количества АО, выпадающих над Черным морем. Используются данные реанализа ERA5 для каждого месяца за период 1959–2005 гг.

**Fig. 3.** Linear quantile regression coefficient (mm/month / year) vs. quantile value calculated for the amount of precipitation over the Black Sea. The ERA5 atmospheric re-analysis data for each month for the period 1959–2005 have been used.

Рис. 4 демонстрирует различия характера изменений квантильных трендов, рассчитанных по данным о количестве АО на основе модельных расчетов по каждой РКМ из проекта CORDEX и на основе реанализа ERA5.

Положительные тенденции изменения количества выпадающих АО в зимний сезон и близкие к нулю в октябре получены по данным РКМ 000, 001, 002, 015. Разность между коэффициентами квантильных трендов

по данным этих РКМ и реанализа ERA5 в зимние месяцы высока и положительна, а в октябре высока и отрицательна. Для этих РКМ характерны тенденции, которые противоположны по знаку обнаруженным в данных реанализа.



**Рис. 4.** Разность между коэффициентом линейной квантильной регрессии (мм/месяц / год) для каждого значения квантиля, рассчитанного для величин количества АО, выпадающих над Черным морем, для каждого месяца за период 1959–2005 гг., по данным РКМ из проекта CORDEX и реанализа ERA5. Если разность положительна, то коэффициент по данным РКМ больше, чем по данным ERA5. Если разность отрицательна – наоборот.

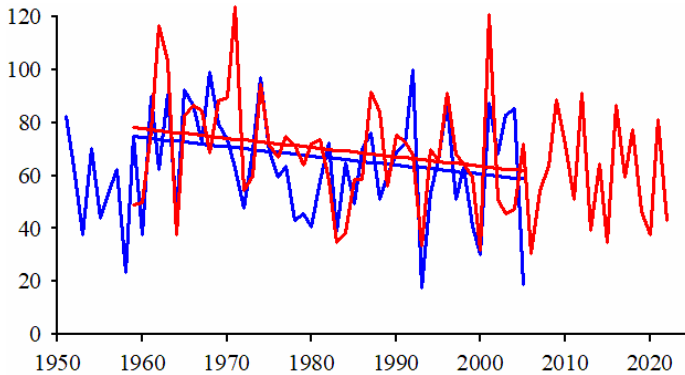
**Fig. 4.** The difference between the linear quantile regression coefficient (mm/month/ year) for each quantile value calculated for precipitation over the Black Sea for each month for the period 1959–2005, in the RCM data from the CORDEX project and the ERA5 re-analysis. If the difference is positive, then the coefficient in RCM is greater than in ERA5. If the difference is negative, vice versa.

Отсутствие однонаправленных тенденций изменения количества выпадающих АО с января по март, отрицательные тенденции в мае и декабре и положительные в октябре–ноябре обнаружены по данным РКМ 003. Разность между коэффициентами квантильных трендов по данным этой РКМ и реанализа ERA5 в январе положительна, в мае отрицательна, а в октябре и декабре – около нуля. Таким образом, для этой РКМ характерно совпадение по знаку и величине тенденций АО в октябре и декабре с данными реанализа, однако в целом очень неточное моделирование величины АО для зимнего периода (рис. 2) не позволяет рекомендовать использование РКМ 003 для получения реалистичных сценарных оценок.

Невысокие отрицательные тенденции изменения количества выпадающих АО в зимние месяцы и положительные тенденции в октябре выделены по данным РКМ 004. Разность между коэффициентами квантильных трендов по данным этой РКМ и реанализа ERA5 в зимние месяцы невысока и положительна, а в октябре невысока и отрицательна. Для этой РКМ характерно совпадение по знаку тенденций в зимние месяцы и октябре, но величины коэффициентов трендов меньше, чем по данным реанализа.

Существенные тенденции изменения количества выпадающих АО в большей части диапазона значений квантилей не обнаружены почти во все месяцы по данным РКМ 005, 006, 007, 008, 010, 011, 013 и 014. Вместе с тем обращает на себя внимание тот факт, что коэффициенты квантильных трендов по данным этих РКМ и реанализа ERA5 схожи между собой по абсолютной величине, но противоположны по знаку. Разница между соответствующими коэффициентами в зимние месяцы высока и положительна, а в октябре высока и отрицательна.

Невысокие положительные тенденции изменения количества выпадающих АО в январе и октябре и существенные отрицательные тенденции в декабре получены по данным РКМ 009. Разность между коэффициентами квантильных трендов по данным этой РКМ и реанализа ERA5 в январе положительна, в октябре отрицательна, а в декабре – около нуля. На рис. 5 для иллюстрации совпадения тенденций изменения количества выпадающих АО приведены временные ряды в декабре (месяце максимального количества АО в годовом цикле [2]).



**Рис. 5.** Временные ряды количества АО (мм/месяц), выпадающих над Черным морем в декабре, по данным РКМ 009 из проекта CORDEX (дано синим цветом) и реанализа ERA5 (дано красным цветом). Прямые линии – медианные тренды (для значения квантиля 0,5) за общий период 1959–2005 гг.

**Fig. 5.** Time series of the amount of precipitation (mm/month) at the Black Sea surface in December in RCM 009 data from the CORDEX project (blue) and reanalysis ERA5 (red). Straight lines are median trends (for a quantile value of 0,5) over the overlapped period 1959–2005.

Угловой коэффициент медианного тренда (для значения квантиля 0,5) по данным РКМ 009 составляет  $-0,34$  мм/месяц / год, а по данным реанализа ERA5 равен  $-0,35$  мм/месяц / год. Отмечается также хорошее согласие межгодовых изменений количества выпадающих АО по данным этой РКМ и реанализа ERA5 с коэффициентом ранговой корреляции Спирмена, равным  $0,45$  в период 1959–2005 гг.

Невысокие положительные тенденции изменения количества выпадающих АО в зимние месяцы и октябре выделены по данным РКМ 012. Разность между коэффициентами квантильных трендов по данным этой РКМ и реанализа ERA5 в зимние месяцы положительна, а в октябре невысока и отрицательна. Для этой РКМ, по сравнению с данными реанализа, характерны противоположные тенденции в зимние месяцы, а в октябре совпадающие по знаку, но меньшие по величине.

### Заключение

Проанализирована способность 16 РКМ из проекта CORDEX адекватно воспроизводить средние величины и долгопериодные тенденции изменения количества АО, выпадающих над Черным морем. Данные РКМ сопоставляются с данными реанализа ERA5 в контрольный период (1959–2005 гг.). Показано, что величины количества АО из этого реанализа для зимы хорошо согласованы с данными инструментальных наблюдений из массива E-OBS, относящимися к северной части Крыма. Для лета соответствующие коэффициенты ранговой корреляции по Спирмену уменьшаются приблизительно в 1,5 раза. Оценены величины среднегодового количества АО и среднесезонного количества АО для зимы и лета, а также долгопериодные тенденции их изменения во все месяцы в широком диапазоне квантилей. Получено, что среднесезонное количество АО, выпадающих над Черным морем, в зимний сезон удовлетворительно воспроизводится большинством РКМ, за исключением РКМ 003, а в летний сезон – всего шестью РКМ. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости более точной параметризации осадков конвективного типа, как в РКМ из проекта CORDEX, так и в реанализе ERA5.

Количество АО, выпадающих над Черным морем, по данным половины из всех РКМ, представленных в проекте CORDEX, характеризуется незначительными тенденциями в большей части диапазона изменения квантилей почти во все месяцы. Величины количества АО по данным четырех РКМ показывают значительные тенденции, которые противоположны по знаку тенденциям, обнаруженным в данных реанализа ERA5. РКМ 003 воспроизводит высокие положительные тенденции изменения количества выпадающих АО в октябре и отрицательные тенденции в декабре, но сильно завывает зимние и, как следствие, среднегодовые АО. Тенденции изменения количества выпадающих АО, полученные по данным РКМ 004, совпадают по знаку с тенденциями, выделенными по данным реанализа ERA5, но соответствующие коэффициенты квантильных трендов по результатам

модельных расчетов занижены. РКМ 009 (012) верно воспроизводит отрицательные (положительные) тенденции изменения количества выпадающих АО в декабре–январе (в октябре).

Таким образом, анализ численных расчетов количества АО, выпадающих над Черным морем, в рамках проекта CORDEX показал, что использование отдельных РКМ, а именно MPI-CSC-REMO2009 с входными данными из ГКМ MPI-M-MPI-ESM-LR (РКМ 004) во все месяцы, SMHI-RCA4 с входными данными из ГКМ ICHEC-EC-EARTH в зимние месяцы (РКМ 009) и SMHI-RCA4 с входными данными из ГКМ MOHC-HadGEM2-ES в октябре (РКМ 012) представляется оптимальным для оценок тенденций будущих изменений количества АО в рассматриваемом регионе.

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

Работа выполнена в рамках Госзадания ИПТС, № государственной регистрации 121122300074-7.

The research was supported by the state assignment of the Institute of Natural and Technical Systems (Project Reg. No. 121122300074-7).

#### Список литературы

1. *Белокопытов В.Н.* Климатические изменения гидрологического режима Чёрного моря: Дис. ... докт. геогр. наук. Севастополь: МГИ РАН, 2017. 377 с.
2. *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 430 с.
3. *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. DOI: 10.7868/S0869565216320190.
4. *Ефимов В.В., Шакалова Е.С.* О формировании атмосферных сезонных осадков в Черноморском регионе // Морской гидрофизический журнал. 2008. № 4. С. 43-51.
5. *Репетин Л.Н., Долотов В.В., Липченко М.М.* Пространственно-временная и климатическая изменчивость атмосферных осадков, выпадающих на поверхность Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. 2006. Т. 14. С. 462-476.
6. *Справочник по климату Черного моря*. М.: Гидрометеиздат, 1974. 406 с.
7. *Тимофеев А.А., Стерин А.М.* Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 27-41.
8. *Тимофеев Н.А., Юровский А.В.* Климатический мониторинг атмосферных осадков и радиации на Чёрном море по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 2009. № 1. С. 68-84.
9. *Яровая Д.А., Ефимов В.В.* Численные климатические оценки осадков и температуры приповерхностного воздуха для Черноморского региона // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 3 (189). С. 63-76.
10. *Abbas S.A., Xuan Y., Song X.* Quantile regression based methods for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions // Water Resources Management. 2019. Vol. 33. P. 4249-4264. DOI: 10.1007/s11269-019-02362-0
11. *Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G.* Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs // J. Water Clim. Change. 2016. Vol. 7, no. 1. P. 103-113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081

12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, no 730. P. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803
13. Kotlarski S., Keuler K., Christensen O.B., Colette A., Déqué M., Gobiet A., Goergen K., Jacob D., Lüthi D., van Meijgaard E., Nikulin G., Schär C., Teichmann C., Vautard R., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble // *Geoscientific Model Development*. 2014. Vol. 7, no. 4. P. 1297-1333. DOI: 10.5194/gmd-7-1297-2014
14. Koenker R. *Quantile Regression*. Econometric Society Monographs. Cambridge, 2005. 349 p.
15. Polonsky A. *The Ocean's Role in Climate Change*. Cambridge Scholars Publishing. Newcastle, UK, 2019. 294 p.
16. Romanou A., Tselioudis G., Zerefos C.S., Clayson C.-A., Curry J.A., Andersson A. Evaporation-precipitation variability over the Mediterranean and the Black Seas from satellite and reanalysis estimates // *J. Clim.* 2010. Vol. 23, no. 19. P. 5268-5287. DOI: 10.1175/2010JCLI3525.1

### References

1. Belokopytov V.N. Klimaticheskiye izmeneniya gidrologicheskogo rezhima Chernogo morya: Diss. doct. geogr. nauk [Climatic changes in the hydrological regime of the Black Sea]. Doct. geogr. sci. thesis, Sevastopol: MGI, 2017, 377 p. [in Russ.].
2. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR*. T.IV. Chernoye more. Vyp.1. Hidrometeorologicheskiye usloviya [Hydrometeorology and hydrochemistry of the seas of the USSR. T.IV. Black Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions]. Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat publ., 1991, 430 p. [in Russ.].
3. Eliseev A.V., Semenov V.A. Arctic climate changes in the 21st century: ensemble model estimates accounting for realism in present-day climate simulation. *Dokl. Earth Sci.*, 2016, vol. 471, no. 1, pp. 1183-1187. DOI: 10.1134/S1028334X16110131.
4. Efimov V.V., Shakalova E.S. On the formation of atmospheric seasonal precipitation in the Black Sea region. *Phys. Oceanogr.*, 2008, vol. 18, pp. 204-211. DOI: 10.1007/s11110-008-9022-6.
5. Repetin L.N., Dolotov V.V., Lipchenko M.M. Prostranstvenno-vremennaya i klimaticheskaya izmenchivost' atmosferykh osadkov, выпадayushchikh na poverkhnost' Chernogo morya [Spatial-temporal and climatic variability of atmospheric precipitation falling on the surface of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon*, 2016, vol. 14, pp. 462-476 [in Russ.].
6. *Spravochnik po klimatu Chernogo morya* [Guidebook on the climate of the Black Sea]. Moscow: Gidrometeoizdat publ., 1974, 406 p. [in Russ.].
7. Timofeev A.A., Sterin A.M. Using the quantile regression method to analyze changes in climate characteristics. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 5, pp. 310-319. DOI: 10.3103/S106837391005002X.
8. Timofeev N.A., Yurovsky A.V. Klimaticheskii monitoring atmosferykh osadkov i radiatsii na Chornom more po sputnikovym dannym [Climatic monitoring of precipitation and radiation in the Black Sea based on satellite data]. *Phys. Oceanogr.* 2009, no. 1. pp. 68-84 [in Russ.].
9. Iarovaia D.A., Efimov V.V. Numerical climatic estimations of precipitation and surface air temperature for the Black Sea region. *Phys. Oceanogr.* 2016, no. 3, pp. 57-69. DOI: 10.22449/1573-160X-2016-3-57-69
10. Abbas S.A., Xuan Y., Song X. Quantile regression based methods for investigating rainfall trends associated with flooding and drought conditions. *Water Resources Management*, 2019, vol. 33, pp. 4249-4264. DOI: 10.1007/s11269-019-02362-0

11. Basharin D., Polonsky A., Stankūnavičius G. Projected precipitation and air temperature over Europe using a performance-based selection method of CMIP5 GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 103-113. DOI: 10.2166/wcc.2015.081
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803
13. Kotlarski S., Keuler K., Christensen O.B., Colette A., Déqué M., Gobiet A., Goergen K., Jacob D., Lüthi D., van Meijgaard E., Nikulin G., Schär C., Teichmann C., Vautard R., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Geoscientific Model Development*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 1297-1333. DOI: 10.5194/gmd-7-1297-2014
14. Koenker R. Quantile Regression. *Econometric Society Monographs*. Cambridge, 2005, 349 p.
15. Polonsky A. The Ocean's Role in Climate Change. Cambridge Scholars Publishing. Newcastle, UK, 2019, 294 p.
16. Romanou A., Tselioudis G., Zerefos C.S., Clayson C.-A., Curry J.A., Andersson A. Evaporation-precipitation variability over the Mediterranean and the Black Seas from satellite and reanalysis estimates. *Journal of Climate*, 2010, vol. 23, no. 19, pp. 5268-5287. DOI: 10.1175/2010JCLI3525.1.

Поступила 03.07.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;  
принята в печать 06.10.2023.

Submitted 03.07.2023; approved after reviewing 20.09.2023;  
accepted for publication 06.10.2023.