

УДК 556.06

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСКОЛЬКИМИ МОДЕЛЯМИ АТМОСФЕРНОГО РЕАНАЛИЗА НА ТЕРРИТОРИИ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА<sup>1</sup>

© 2024 г. В. М. Морейдо<sup>a, d, \*</sup>, П. Н. Терский<sup>a, b</sup>, Д. В. Абрамов<sup>c</sup><sup>a</sup> Институт водных проблем РАН, Москва, 119333 Россия<sup>b</sup> Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, 119034 Россия<sup>c</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва, 121205 Россия<sup>d</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: vsevolod.moreydo@iwp.ru

Поступила в редакцию 23.04.2024 г.

После доработки 21.05.2024 г.

Принята к публикации 21.05.2024 г.

Многообразие природных условий п-ва Крым определяет различные режимы основных метеорологических характеристик, влияющих на водообеспеченность территории. Для оценки пространственно-временной неоднородности этих характеристик, а также для преодоления проблемы пропусков в данных наземных наблюдений могут использоваться результаты расчетов по моделям общей циркуляции атмосферы Земли с ассимиляцией данных наземных наблюдений, также известные как атмосферный реанализ. Приведен результат оценки качества воспроизведения приземной температуры воздуха и суммы осадков моделями атмосферного реанализа EWMBI, ERA5-Land и MSWEP в сравнении с данными наземных метеонаблюдений. Приведены основные характеристики использованных наборов данных (как наблюдений, так и расчетов), основные методы верификации, результаты оценки и выводы о применимости использованных данных в задачах моделирования. Оценены средние ошибки моделей по температуре воздуха и количеству осадков за различные периоды осреднения (сутки, месяц, год). Так, средние коэффициенты корреляции за разные периоды осреднения по температуре находятся в пределах  $0.74 \div 0.97$ , по осадкам –  $0.52 \div 0.79$ . Получено представление, что все модели достаточно корректно воспроизводят значения температуры и суммы осадков за разные периоды осреднения, однако у всех выявлена тенденция к занижению суточных сумм осадков при одновременном завышении количества дней с осадками.

*Ключевые слова:* атмосферный реанализ, температура воздуха, атмосферные осадки, экстремальные осадки, гидрометеорологические данные.

DOI: 10.31857/S0321059624060011 EDN: VPWJYQ

### ВВЕДЕНИЕ

Пространственное распределение метеорологических величин – как непрерывных (температура и влажность воздуха), так и дискретных (атмосферные осадки, в особенности – высокой интенсивности) – определяющий фактор для формирования речного стока на территории суши. Данные о пространственном распределении температуры и осадков используются в гидрологических моделях для расчета стока воды с водосбора за период инструментальных наблюдений, а также для разработки методов гидрологического прогноза различной заблаговременно-

сти [1, 4]. Пространственная изменчивость этих величин, в особенности осадков, – основной лимитирующий фактор точности исходных данных для моделей формирования речного стока. Инструментальные измерения позволяют определять характеристики полей метеовеличин только в точке наблюдения, что вынуждает прибегать к сложным методам интерполяции для восстановления структуры поля на обширной территории рассматриваемого водосбора. В горных районах, где орография существенно влияет на пространственное распределение температуры и осадков, а ограниченная доступность местности не позволяет разместить достаточное количество измерительных станций, могут возникать существенные отклонения между интерполированными и реальными значениями метеовеличин, в особен-

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Государственного задания ИВП РАН (темы 0126-2021-0001 (121040700170-9) и FMWZ-2022-0003).

ности при прохождении осадков высокой интенсивности в короткие промежутки времени.

Эволюция методов расчета полей метеорологических величин в последние десятилетия была направлена в сторону разработки методов атмосферного реанализа – глобальных физически обоснованных атмосферных моделей, учитывающих данные наблюдений при помощи их ассимиляции в расчетные зависимости для воспроизведения основных процессов тепло- и массообмена в атмосфере в узлах глобальной регулярной расчетной сетки [5, 6, 18, 24, 31]. Использование таких моделей позволяет получить значения целого ряда метеорологических переменных с высоким разрешением по пространству и во времени. Такие данные, в особенности распределение атмосферных осадков и приземной температуры воздуха, критически важны для оценки водных ресурсов любой территории.

С ранних лет развития моделей атмосферного реанализа, таких как NCEP1 [21], NCEP2 [23], MERRA [26], MERRA-2 [14], JRA-55 [12], и до серии наиболее современных, разрабатываемых в Европейском центре среднесрочных метеорологических прогнозов методов реанализа ERA-15, ERA-40 [30], ERA-Interim [10], ERA5 [19] и ERA5-Land [25] в последние годы они были предметом оценки качества воспроизведения данных измерений как в глобальном, так и в региональном масштабе [3, 16], а также оценки возможности использования этих данных как источник данных для гидрологического моделирования [27–29].

Географическое положение и орографическое строение п-ова Крым – причина пестрой картины распределения природных зон на этой сравнительно небольшой по площади территории [11]. Распределение атмосферных осадков в пространстве здесь очень контрастно – от 250 мм/год на севере полуострова до 1000 мм в южной горной части. При этом наблюдательная сеть за атмосферными осадками достаточно редкая, особенно в горах на юге полуострова, там – верховья всех речных систем и формируется основная масса его водных ресурсов. Для целей исследования распределения осадков и моделирования формирования речного стока

полуострова целесообразно использовать данные атмосферного реанализа. Настоящее исследование направлено на локальную верификацию двух продуктов атмосферного реанализа и одного синтетического набора данных об атмосферных осадках на территории Крыма по данным наземных наблюдений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### *Исходные материалы*

В качестве тестируемых на соответствие данным наблюдений были выбраны наборы сеточных атмосферных данных ERA5-Land, EWEMBI и MSWEP.

Набор данных EWEMBI (Earth2Observe, WFDEI, ERA-Interim data Merged, Bias-corrected for ISIMIP [13]), синтезированный в Потсдамском институте климата (Германия) из нескольких глобальных наборов данных, таких как реанализ ERA-Interim [10], WFDEI [32], E2OBS [8], NASA/GEWEX SRB [9], – наиболее ранний по времени создания из анализируемых продуктов. Реанализ EWEMBI был изначально предназначен для корректировки результатов расчетов по ансамблю глобальных климатических моделей в эксперименте ISI-MIP (The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) за исторический период с 1979 по 2016 г. и приведения этих расчетов в соответствие с данными инструментальных наблюдений, тем самым – ликвидации систематической ошибки (так называемая “bias-correction”) и уточнения данных климатических расчетов до конца XXI в. [15, 22]. Данные в наборе представлены в виде хронологических рядов в узлах глобальной сетки с пространственным разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Территория Крыма покрыта 50 ячейками расчетной сетки (рис. 1). Для сопоставления с инструментальными наблюдениями взяты ряды среднесуточных величин приземной температуры воздуха  $t_{as}$  ( $^\circ\text{C}$ ) и суточной суммы осадков  $pr$  (мм).

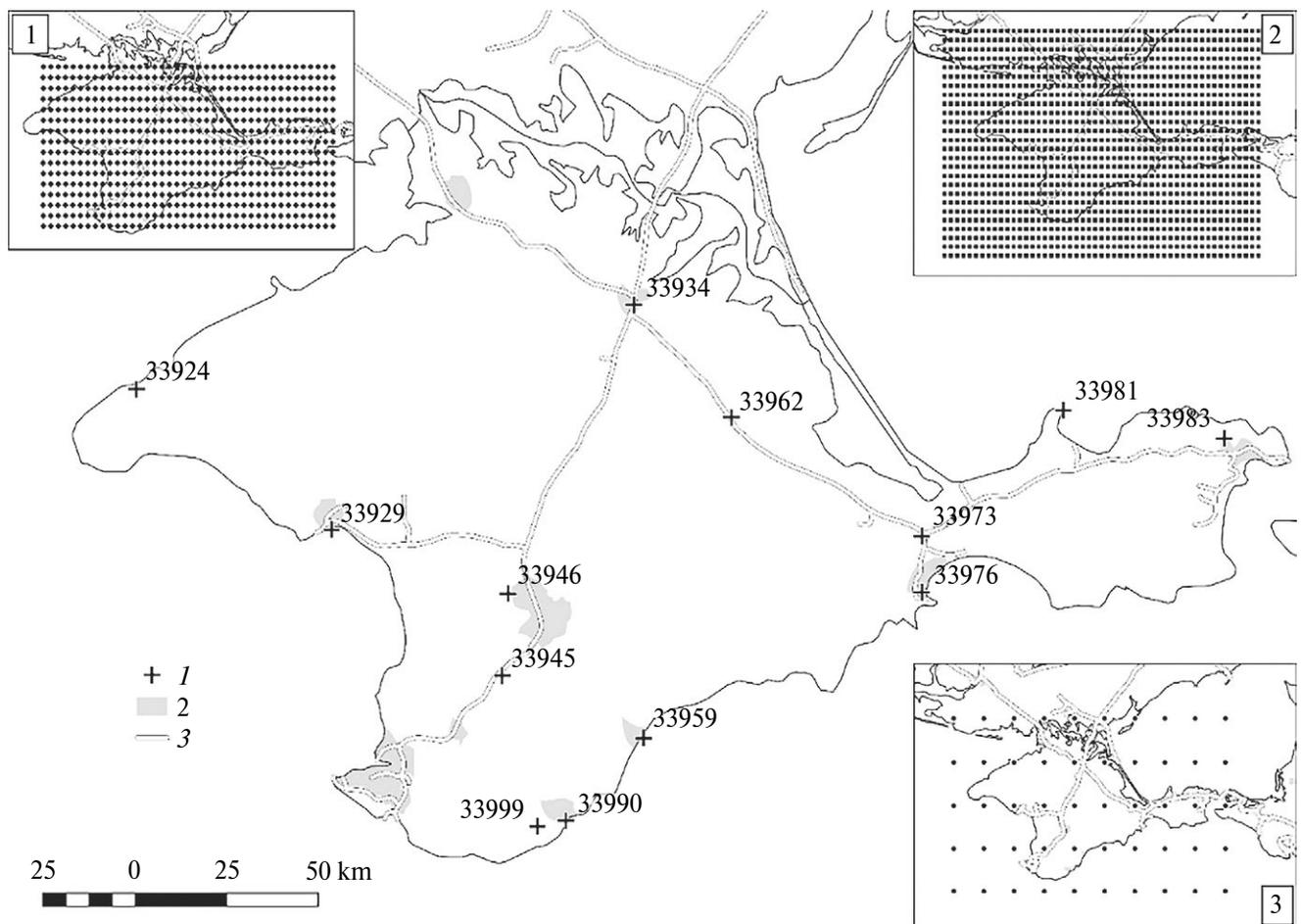
Продукт оперативного атмосферного реанализа ERA5-Land представляет собой результат расчета по модели земной системы с начальными условиями из модели общей циркуляции атмосферы [25]. Расчет проводится ансамблевым

методом на часовом интервале по глобальной расчетной сетке пространственным разрешением  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Архив расчетов начинается с 1950 г. и доступен в квазиоперативном режиме с запаздыванием 5 сут от даты обращения к архиву. Для настоящего исследования взяты данные по температуре воздуха и количеству осадков с 1970 по 2022 г., которые были агрегированы до суточных значений.

Набор глобальных данных об осадках MSWEP (Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation [7]) представляет собой результат оптимального взвешивания данных наблюдений на глобальной сети метеостанций, измерений со спутников и расчетов по модели общей циркуляции, т. е. постобработки данных нескольких источников информации с помощью методов машинного

обучения. В наборе содержатся только данные об осадках на расчетной сетке  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , при этом временная дискретность данных – 3 ч, начало данных – с 1979 г. практически в реальном времени (запаздывание последнего срока в данных – 3 ч от среднего времени по Гринвичу). Для анализа срочные данные были агрегированы до суточных значений.

Для верификации данных атмосферных реанализов использованы различные источники данных, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет. В базе данных ВНИИГМИ-МЦД [2] содержатся сведения о наблюдениях только на трех метеостанциях на исследуемой территории (рис. 1): Симферополь (код WMO 33946), Феодосия (33976) и Керчь (33983). Очевидно, что для надежной оценки продуктов реанализа



**Рис. 1.** Картограмма территории расположения метеостанций, использованных в исследовании. Цифрами на схеме обозначены: 1 – метеостанции, 2 – города, 3 – железнодорожные магистрали. Индексы – по табл. 1. Во врезках представлены фрагменты расчетных сеток MSWEP (1), ERA5-Land (2) и EWEMBI (3).

этого недостаточно. В связи с этим в качестве основного массива данных наземных наблюдений использован массив суточного осреднения по данным более 9000 метеостанций глобального охвата Global Surface Summary of the Day (GSOD), полученный из глобальной базы Национального центра информации по окружающей среде Национальной администрации по атмосфере и океану США NOAA NCEI [17], здесь и далее именуемый “Данные GSOD”. Для исследуемой территории получены временные ряды среднесуточных значений температуры воздуха и суточных сумм осадков с 13 метеостанций на территории Крымского п-ова (рис. 1).

Период наблюдений на них колеблется от 10 до 120 лет (табл. 1). Несмотря на это, по каждой станции использованы все данные, период которых пересекается с периодом реанализа 1950–2021 гг.

#### Методы

Для анализа исходных массивов данных, полученных из соответствующих источников в сети Интернет, разработан программный код на языке R. Для сопоставления данных на метеостанциях и в узлах расчетных сеток использован пакет (библиотека программных функций) raster [20]. Данные из узлов сетки пересчитывались в бли-

жайшую точку расположения метеостанции с помощью метода билинейной интерполяции.

Первоначально данные, полученные из архива GSOD, были проверены на соответствие данным из архива ВНИИГМИ-МЦД [2] путем сопоставления значений на метеостанциях 33946 Симферополь, 33976 Феодосия и 33983 Керчь. Результаты показали, что коэффициенты линейной корреляции для температуры и осадков между наборами данных GSOD и ВНИИГМИ-МЦД составляют  $>0.99$ , среднеквадратическая ошибка по температуре –  $0.16^\circ\text{C}$ , по осадкам –  $0.07$  мм. Наличие ошибки в данных объясняется двойной конвертацией единиц: особенность набора данных GSOD – хранение в американской системе мер. Несмотря на наличие этих незначительных ошибок, было принято решение использовать данные GSOD для оценки продуктов реанализа и сеточных осадков на всех метеостанциях.

Для оценки качества воспроизведения данных наблюдений за температурой воздуха и осадками на трех интервалах осреднения (сутки, месяц, год) рассчитаны следующие метрики: средняя абсолютная ошибка (“mean absolute error”, MAE), средняя квадратическая ошибка (“root mean square error”, RMSE) и коэффициент линейной корреляции  $R$ . Для осадков отдельно оценивалось среднее количество дней с осадка-

**Таблица 1.** Перечень метеостанций и периодов, за которые получены данные о среднесуточной температуре воздуха и суточной сумме осадков. Характеристики использованных рядов наземных наблюдений

№	Индекс ВМО	Название	Высота, м абс.	Начало	Конец	$\bar{T}$ , °C	$\bar{P}$ , мм
	33924	Черноморское	10	09.01.1955	26.08.2021	11.3	338
	33929	Евпатория	6	03.01.1959	11.06.2009	8.8	402
	33934	Джанкой	8	02.01.1955	11.06.2009	10.5	405
	33945	Почтовое	176	01.01.2000	11.06.2009	13.5	459
	33946	Симферополь	181	01.03.1898	26.08.2021	10.7	495
	33959	Алушта	7	01.01.1959	11.06.2009	11.9	466
	33962	Нижнегорск	20	01.01.1959	11.06.2009	8.0	399
	33973	Владиславовка	37	02.01.1959	11.06.2009	12.9	419
	33976	Феодосия	22	01.01.1982	30.03.2015	11.9	388
	33981	Мыс Казантип	101	03.09.1977	11.06.2009	9.8	368
	33983	Керчь	49	01.01.1936	26.08.2021	11.3	416
	33990	Ялта	72	29.08.1949	30.03.2015	12.8	573
	33999	Ай-Петри	1180	01.09.1899	31.12.2012	5.0	932

ми  $>0$  мм за месяц, а также рассчитывались бинарные метрики условного распределения модели и наблюдений: вероятность определения наличия осадков (“probability of detection”, POD) и вероятность ложного определения наличия осадков (“false alarm rate”, FAR):

$$\text{POD} = \frac{a}{a+c}, \quad (1)$$

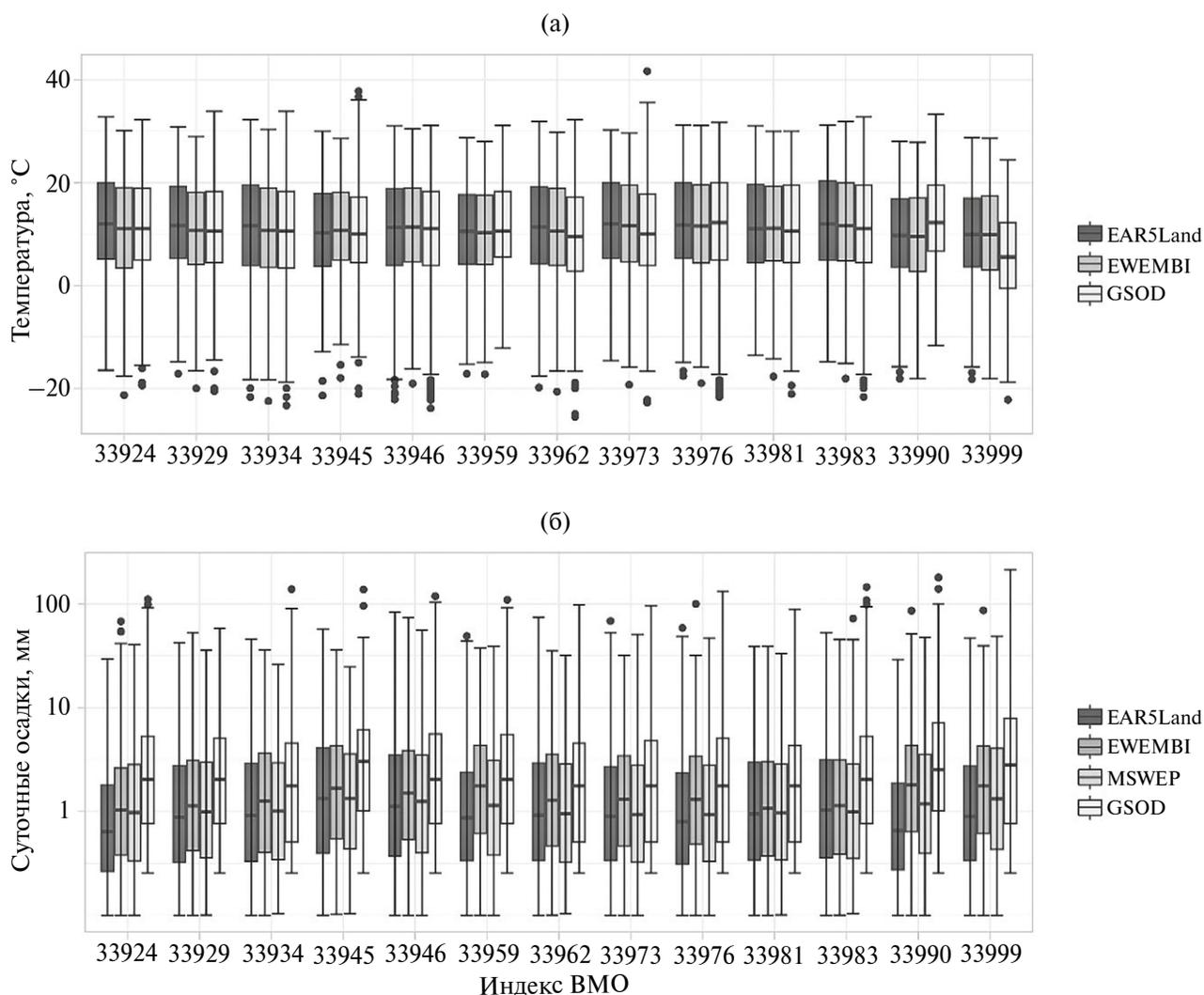
$$\text{FAR} = \frac{b}{a+b}, \quad (2)$$

где  $a$  – количество корректно определенных реанализом дней с осадками,  $b$  – количество ложно определенных дней с осадками,  $c$  – количество реально наблюдавшихся дней с осадками, не об-

наруженных в данных реанализа. Воспроизведение моделями экстремальных осадков оценено отдельно путем расчета индексов POD и FAR для событий с фактическими суточными суммами осадков  $>10$  мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Все описанные метрики рассчитаны для всех метеостанций по отдельности, затем осреднены и далее демонстрируются в виде средних значений для массива станций либо распределения величины метрики. Распределение суточных значений температуры воздуха по наборам данных реанализов EWEMBI и ERA5-Land на всех метеостанциях близко к наблюдавшемуся



**Рис. 2.** Сравнение распределений суточных значений температуры (а) и сумм осадков (б) по метеостанциям. Закрашенные области показывают 50% распределения, линии – по 25%, горизонтальная черта – медиана, точки – выбросы. Вертикальная ось (б) – логарифмическая.

ся (рис. 2а). При этом распределение суточных сумм осадков зачастую существенно занижено (рис. 2б), как и максимальные суточные осадки.

Средняя по всем станциям корреляция суточных значений температуры воздуха по данным наблюдений с данными реанализа EWEMBI составляет 0.975, реанализа ERA5-Land – 0.979 (табл. 2).

Суточные значения температуры воздуха и суммы осадков воспроизведены с большей точностью реанализом ERA5-Land, при этом линейная связь уменьшается с увеличением периода осреднения при практически неизменной ошибке. Это имеет обратный эффект для корреляции осадков – значения возрастают при увеличении периода осреднения. Годовые средние значения корреляции температуры и осадков лучше у модели EWEMBI, хотя ошибка осадков меньше у MSWEP при меньшей линейной связности.

Ошибки воспроизведения годовой суммы осадков меньше у MSWEP, хотя корреляция выше также у EWEMBI, при несколько большей ошибке. Распределение ошибок среднемесячных значений температуры показывает, что воспроизведение по всем метеостанциям достаточно равномерное и ошибка составляет в среднем  $\sim 1^\circ\text{C}$  как по реанализу ERA5Land, так и по реанализу EWEMBI (рис. 3а). При этом наблюдается небольшое увеличение ошибок в декабре–январе и августе–сентябре.

Ошибки определения среднемесячных сумм осадков минимальны для реанализа MSWEP (рис. 3б), однако в отдельные месяцы весной и осенью реанализ EWEMBI также показывает низкие значения. В летние месяцы наибольшая ошибка у ERA5Land могут достигать 30–40 мм.

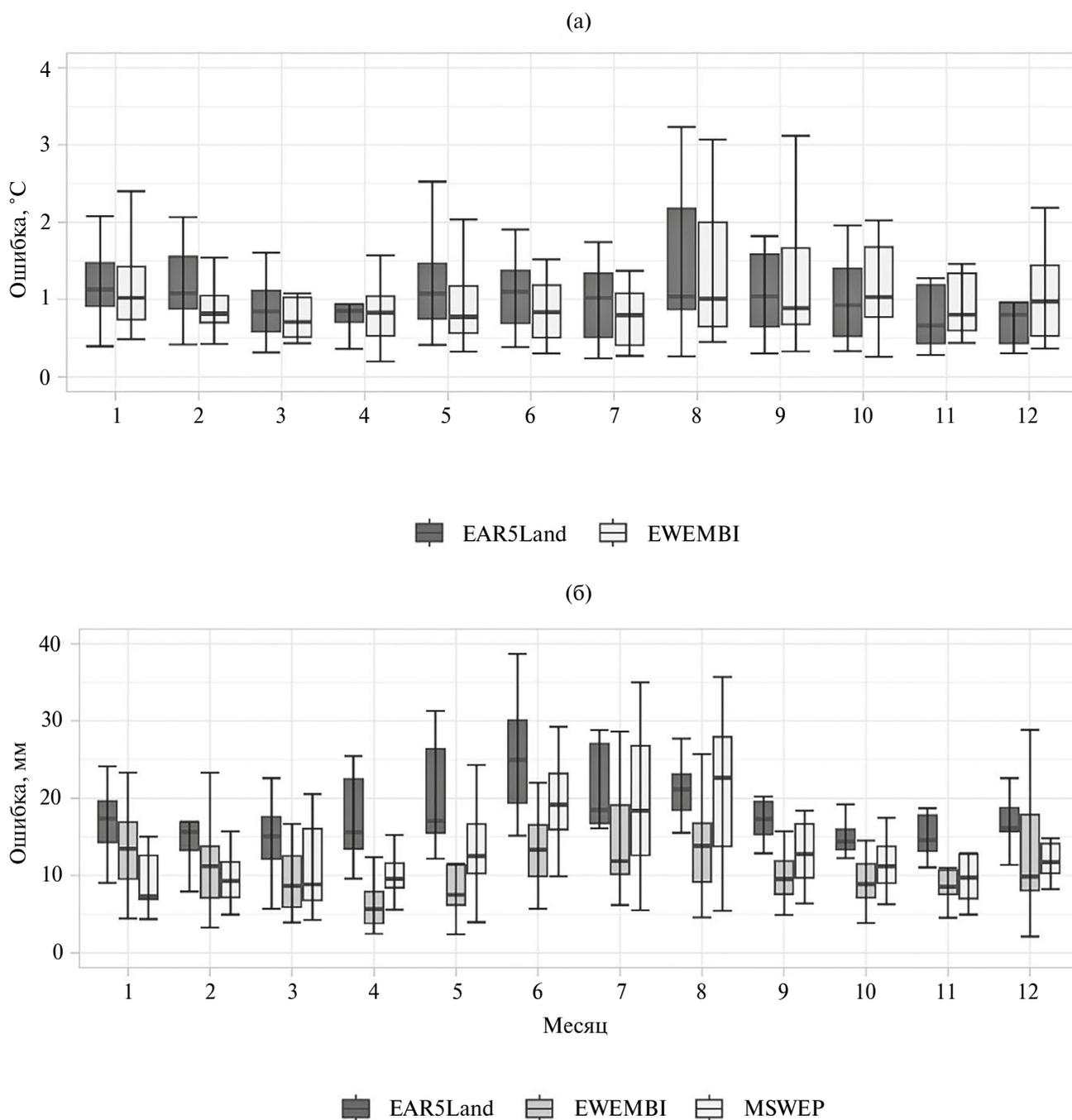
Количество дней с осадками не воспроизводится адекватно ни одной моделью (рис. 4). В среднем каждая модель в два раза, а ERA5Land – до 3 раз превышает количество дней с осадками, особенно в летние месяцы. Связанные с этим показатели POD определения наличия суточных осадков  $>0.01$  мм наивысшие у ERA5Land (рис. 5а), но для нее также характерны и наивысшие значения доли ложного определения наличия осадков FAR – до 0.7 в летние месяцы, т. е.  $>70\%$  событий выпадения осадков было неверно определено моделью. Такая тенденция сохраняется и для событий выпадения сумм осадков  $>10$  мм в сутки: ERA5Land показывает самые высокие значения как POD, так и FAR (рис. 5б). MSWEP при этом почти так же правильно определяет наличие осадков, но делает меньше ошибочных определений.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Воспроизведение температуры воздуха в моделях реанализа происходит с приемлемой точностью, так как систематическая ошибка отсутствует, а случайные ошибки в среднем

**Таблица 2.** Оценка качества воспроизведения температуры воздуха и суммы осадков по суточным, месячным и годовым интервалам (полужирным шрифтом – лучшие значения показателя из всех продуктов)

Набор данных	Температура воздуха			Сумма осадков		
	<i>R</i>	MAE, °C	RMSE, °C	<i>R</i>	MAE, мм	RMSE, мм
Сутки						
EWEMBI	0.975	1.82	2.34	0.480	1.85	4.58
ERA5-Land	<b>0.979</b>	<b>1.73</b>	<b>2.21</b>	<b>0.525</b>	<b>1.69</b>	<b>4.40</b>
MSWEP	-	-	-	0.497	1.72	4.56
Месяц						
EWEMBI	0.785	<b>1.53</b>	<b>1.87</b>	0.364	28.0	38.2
ERA5-Land	<b>0.791</b>	1.55	1.89	<b>0.611</b>	<b>24.4</b>	<b>31.8</b>
MSWEP	-	-	-	0.287	27.3	36.9
Год						
EWEMBI	<b>0.741</b>	<b>1.66</b>	<b>2.24</b>	<b>0.796</b>	156	184
ERA5-Land	0.708	1.96	2.77	0.752	192	214
MSWEP	-	-	-	0.630	<b>128</b>	<b>154</b>



**Рис. 3.** Распределение среднеквадратических ошибок реанализа среднемесячных значений температуры (а) и сумм осадков (б).

<1.2 градусов. Что касается воспроизведения осадков, то все модели реанализа показывают систематическое занижение суточных сумм на фоне двух- и трехкратного превышения количества дней с осадками в месяц над реальным. Очевидно, это происходит для достижения лучшего соответствия модельных осадков данным наблю-

дений на более длительных интервалах осреднения — месяц, год; это подтверждается увеличением коэффициента корреляции осадков при увеличении периода осреднения. Дополнительное подтверждение завышения моделями количества событий выпадения осадков — оценка по метрикам условного распределения выпадения

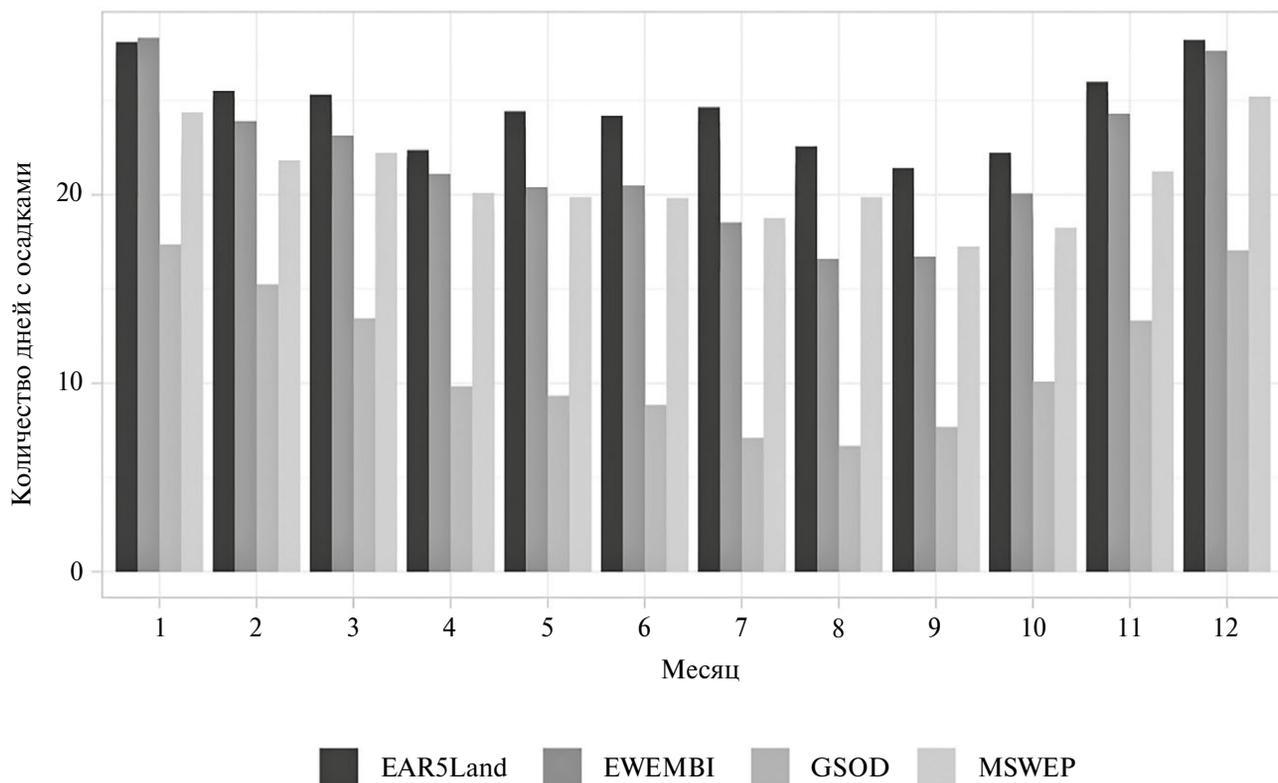


Рис. 4. Внутригодовое распределение количества дней с осадками >0 мм.

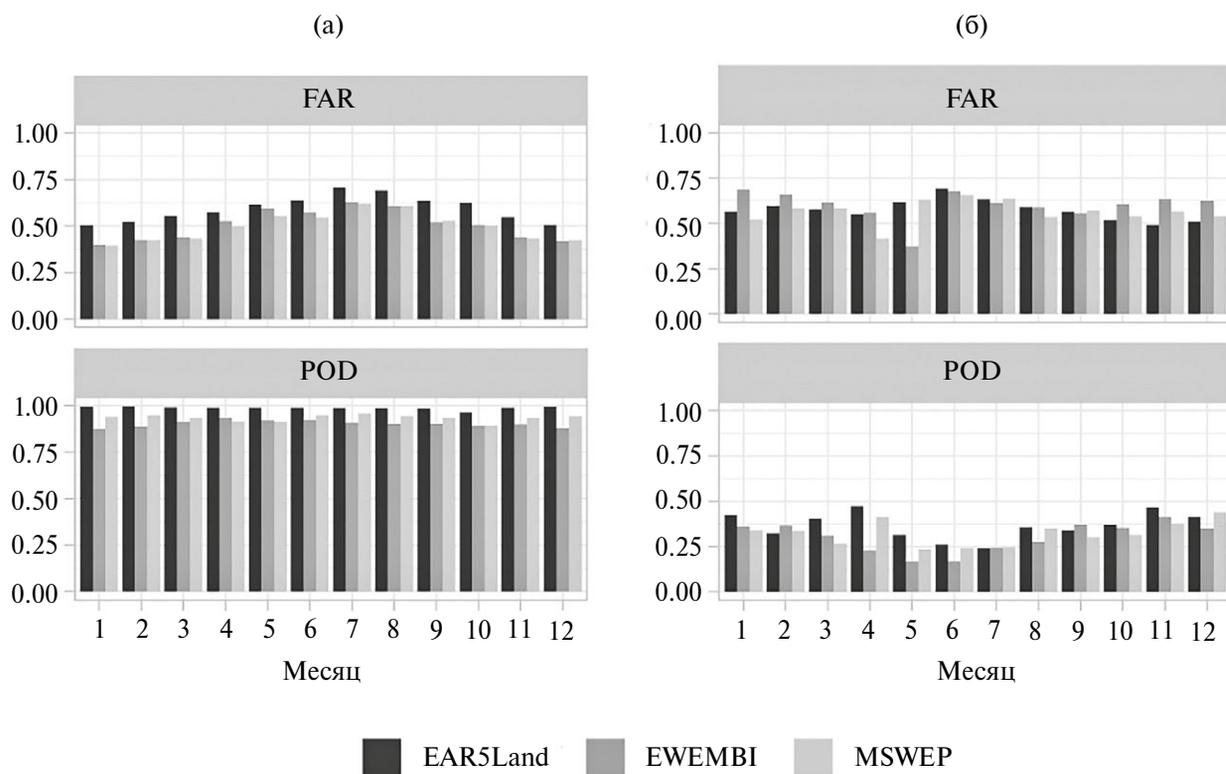


Рис. 5. Показатели условного распределения наличия осадков по модели и данным наблюдений: а – для осадков >0.01 мм, б – для осадков >10 мм.

осадков. По критерию вероятности определения дня с осадками POD наилучшие показатели у модели ERA5-Land, при этом показатель ложного определения FAR — также у этой модели, и его величина доходит до 0.75, что характеризует три четверти событий осадков как ложно определенные. Эти результаты соответствуют некоторым известным из литературы оценкам реанализа ERA5-Land для регионов Средиземноморья [16]. Показатели у MSWEP несколько лучше, так как доли и корректно определенных событий по критерию POD, и некорректно выявленных осадков по критерию FAR ниже, чем у других продуктов.

В конечном итоге средняя ошибка по всем метеостанциям в месячном и годовом интервалах относительно невысока, хотя на станциях в северных степных районах Крыма наблюдается тенденция к завышению, а в горных — к занижению суммарного количества осадков.

Воспроизведение высоких (>10 мм) сумм суточных осадков сравнительно неудачно у всех моделей и повторяет описанную выше тенденцию — доля корректно определенных осадков у ERA5-Land несколько выше остальных на фоне очень большой доли ложно определенных высоких осадков. В этом отношении MSWEP снова выглядит более предпочтительно по причине наименьших из трех моделей значений FAR.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы состояла в оценке применимости различных продуктов метеорологических реанализов для региональных исследований текущих и будущих изменений климата и водных ресурсов. Для этого было необходимо: 1) оценить набор данных EWEMBI, используемый для коррекции климатических проекций до конца XXI в., по которым строятся проекции влияния изменений климата на местные водные ресурсы; 2) оценить два продукта квазиоперативного реанализа атмосферы, которые могут быть использованы для воспроизведения экстремальных гидрологических событий в недавнем прошлом и оценить их гидрологические параметры; 3) оценить эти квазиоперативные продукты на способность воспроизводить температуру и осадки за холодный период года, что

может быть использовано для оценки имеющихся водных ресурсов для водоснабжения региона в теплый период года.

В результате были оценены ошибки моделей реанализа и особенности их воспроизведения естественных условий температуры воздуха и количества осадков. По воспроизведению температуры воздуха в суточном интервале осреднения более предпочтительным оказался реанализ ERA5Land, хотя на годовом интервале несколько лучше оценки у EWEMBI. В отношении суточных сумм осадков по характеристикам линейной связи также выделяется ERA5Land, хотя выявлено существенное превышение этой моделью количества дней с осадками в месяц. Средние ошибки меньше у модели MSWEP, а также она более корректно воспроизводит количество дней с осадками.

В отношении среднемесячных значений температуры и сумм осадков в южной гористой части полуострова все модели показали большие ошибки в зимний период, однако модель MSWEP по сумме осадков оказалась несколько ближе к данным наблюдений.

Корректировка моделей изменения климата по реанализу EWEMBI, в целом, выглядит оправданной по причине воспроизведения этой моделью средних характеристик по укрупненным интервалам времени и пространству. Интенсивные осадки лучше воспроизводятся моделью MSWEP, поскольку она характеризуется меньшей долей ложных событий осадков, чем модель ERA5Land. Оценку запасов воды в снежном покрове целесообразно проводить по данным реанализа ERA5Land, так как на месячном интервале осреднения она имеет наилучшие показатели воспроизведения температуры и осадков. Последняя, впрочем, имеет преимущество в виде учащенных по времени расчетных шагов (1 ч) по сравнению с MSWEP, поэтому может быть полезна в задачах моделирования волн быстроразвивающихся паводков, хотя, возможно, и в ущерб точности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М.* Прогноз максимального стока рек Чер-

- номорского побережья Кавказа // Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 4–16.
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Температура воздуха и количество осадков (ежедневные данные) <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>
  3. Григорьев В.Ю., Фролова Н.Л., Куреева М.Б., Степаненко В.М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения слоя осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. географическая. 2022. № 3 (86). С. 435–446.
  4. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна р. Лена) // Метеорология и гидрология. 2017. Т. 2. С. 78–88.
  5. Ayzel G., Varentsova N., Erina O., Sokolov D., Kurochkin L., Moreydo V. OpenForecast: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia // WATER. 2019. № 8 (11).
  6. Bastola S., Misra V. Evaluation of dynamically downscaled reanalysis precipitation data for hydrological application // Hydrol. Processes. 2014. № 4 (28). С. 1989–2002.
  7. Beck H.E., Wood E.F., Pan M., Fisher C.K., Miralles D.G., Van Dijk A.I.J.M., McVicar T.R., Adler R.F. MSWep v2 Global 3-hourly 0.1° precipitation: Methodology and quantitative assessment // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2019. № 3 (100). С. 473–500.
  8. Calton B., Chellekens J., Martinez-de la Torre A. Water Resource Reanalysis v1: Data Access and Model Verification Results <https://zenodo.org/records/57760> (дата обращения: 14.03.2024)
  9. Cox S.J., Stackhouse P.W., Gupta S.K., Mikovitz J.C., Zhang T. NASA/GEWEX shortwave surface radiation budget: Integrated data product with reprocessed radiance, cloud, and meteorology inputs, and new surface albedo treatment 2017.
  10. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Berg L. van de, Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.J., Park B.K., Peubey C., Rosnay P. de, Tavolato C., Thépaut J.N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2011. № 656 (137). P. 553–597.
  11. Dublyansky Y.V., Klimchouk A.B., Tokarev S.V., Amelichev G.N., Langhamer L., Spötl C. Stable isotopic composition of atmospheric precipitation on the Crimean Peninsula and its controlling factors // J. Hydrol. 2018. № July (565). P. 61–73.
  12. Ebata A., Kobayashi S., Ota Y., Moriya M., Kumabe R., Onogi K., Harada Y., Yasui S., Miyaoka K., Takahashi K., Kamahori H., Kobayashi C., Endo H., Soma M., Oikawa Y., Ishimizu T. The Japanese 55-year Reanalysis “JRA-55”: An Interim Rep // SOLA. 2011. № 1 (7). P. 149–152.
  13. Frieler K., Frieler, Katja, Stefan Lange, Franziska Piontek et al. Assessing the impacts of 1.5°C global warming - Simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // Geosci. Model Development. 2017. № 12 (10). P. 4321–4345.
  14. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., Silva A.M. da, Gu W., Kim G.K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. № 14 (30). P. 5419–5454.
  15. Gelfan A.N., Millionschikova T.D. Validation of a Hydrological Model Intended for Impact Study: Problem Statement and Solution Example for Selenga River Basin // Water Resour. 2018. № Suppl. 1 (45). P. S90–S101.
  16. Gomis-Cebolla J., Rattayova V., Salazar-Galán S., Francés F. Evaluation of ERA5 and ERA5-Land reanalysis precipitation datasets over Spain (1951–2020) // Atmospheric Res. 2023. (284). P. 106606.
  17. GSOD NOAA National Centers of Environmental Information. 1999. Global Surface Summary of the Day – GSOD. 1.0. <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00516> (дата обращения: 04.03.2024)
  18. Hassler B., Lauer A. Comparison of Reanalysis and Observational Precipitation Datasets Including ERA5 and WFDE5 // Atmosphere 2021. V. 12. Page 1462. 2021. № 11 (12). С. 1462.
  19. Hersbach H., Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorol. Soc. 2020. № 730 (146). P. 1999–2049.
  20. Hijmans R.J. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling // 2024.
  21. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deav-

- en D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds R., Jenne R., Joseph D.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996. № 3 (77). P. 437–471.
22. *Kalugin A.* Climate Change Attribution in the Lena and Selenga River Runoff: An Evaluation Based on the Earth System and Regional Hydrological Models // *Water (Switzerland)*. 2022. № 1 (14). P. 118.
23. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L.* NCEP–DOE AMIP–II Reanalysis (R-2) // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2002. № 11 (83). P. 1631–1644.
24. *Lange S.* EartH2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEM-BI) <https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/show-short.php?id=escidoc:3928916> (дата обращения: 24.11.2021)
25. *Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A., Albergel C., Arduini G., Balsamo G., Boussetta S., Choulga M., Harrigan S., Hersbach H., Martens B., Miralles D.G., Piles M., Rodríguez-Fernández N.J., Zsoter E., Buontempo C., Thépaut J.-N.* ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications *Earth System Science Data Discussions* // *Earth System Sci. Data*. 2021. № January 2020 (82). P. 1–50.
26. *Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M. G., Schubert S.D., Takacs L., Kim G.K., Bloom S., Chen J., Collins D., Conaty A., Da Silva A., Gu W., Joiner J., Koster R.D., Lucchesi R., Molod A., Owens T., Pawson S., Pegion P., Redder C.R., Reichle R., Robertson F.R., Ruddick A.G., Sienkiewicz M., Woollen J.* MERRA: NASA’s Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications // *J. Climate*. 2011. № 14 (24). P. 3624–3648.
27. *Sharifi E., Eitzinger J., Dorigo W.* Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. 2019. 17 (11). P. 2018. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/17/2018>
28. *Sorman A.A., Yang H., Hafizi H., Sorman A.A.* Assessment of 13 Gridded Precipitation Datasets for Hydrological Modeling in a Mountainous Basin // *Atmosphere* 2022. V. 13. P. 143. 2022. № 1 (13). P. 143. <https://doi.org/10.3390/atmos13010143>
29. *Tarek M., Brissette F.P., Arsenault R.* Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America // *Hydrol. Earth System Sci.* 2020. № 5 (24). P. 2527–2544.
30. *Uppala S.M., Kållberg P.W., Adrian J. Simmons et al.* The ERA-40 re-analysis // *Quarterly J. Royal Meteorol. Soc.* 2005. № 612 (131). P. 2961–3012.
31. *Ward E., Buytaert W., Peaver L., Wheeler H.* Evaluation of precipitation products over complex mountainous terrain: A water resources perspective // *ADVANCES IN WATER RESOURCES*. 2011. № 10 (34). P. 1222–1231.
32. *Weedon G.P., Balsamo G., Bellouin N., Gomes S., Best M.J., Viterbo P.* The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data // *Water Resour. Res.* 2014. № 9 (50). P. 7505–7514.

## ASSESSING THE REPRODUCTION QUALITY OF METEOROLOGICAL CHARACTERISTICS BY SEVERAL ATMOSPHERIC REANALYSIS MODELS ON THE TERRITORY OF CRIMEAN PENINSULA

V. M. Moreido<sup>a, d, \*</sup>, P. N. Terskii<sup>a, b</sup>, D. V. Abramov<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia

<sup>b</sup>State Oceanographic Institute, Moscow, 119034 Russia

<sup>c</sup>Skolkovo Institute for Science and Technology, Moscow, 121205 Russia

<sup>d</sup>Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

\*e-mail: vsevolod.moreydo@iwp.ru

The diversity of natural conditions of the Crimean Peninsula determines different regimes of the main meteorological characteristics that determine the water availability for the territory. The estimation of the spatiotemporal heterogeneity of these characteristics and the solution of the problem of gaps in the ground-based observation data can be based on the results of calculations by general circulation models of the Earth's atmosphere with assimilation of ground-based observation data, also known as atmospheric reanalysis. Estimates of the quality of reproduction of the surface air temperature and the total precipitation by atmospheric reanalysis models EWEMBI, ERA5-Land, and MSWEP are given and compared with data from ground-based meteorological observations. The main characteristics of the data sets used (both observational and calculated), the main verification methods, the results of estimates and the conclusions regarding the applicability of the data used in simulation problems are given. The mean errors of the models in air temperature and the amount of precipitation over various averaging periods (day, month, year) are given. Thus, the mean coefficients of correlation over different averaging periods vary within 0.74–0.97 for temperature and 0.52–0.79 for precipitation. The results show that all model reproduce the values of the temperature and total precipitation over different averaging periods with an acceptable accuracy; however, all of them show a tendency toward underestimation of the daily sums of precipitation along with an overestimation of the number of days with precipitation.

*Keywords:* atmospheric reanalysis, air temperature, atmospheric precipitation, extreme precipitation, hydrometeorological data