

УДК 551.581.1

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ОСАДКИ В ИЮНЕ 2021 г. НАД ЧЕРНЫМ МОРЕМ В КОНТЕКСТЕ ИХ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

© 2022 г. А. В. Гавриков<sup>1, \*</sup>, О. Г. Золина<sup>1, \*\*</sup>, О. А. Разоренова<sup>1, \*\*\*</sup>, М. П. Александрова<sup>1, \*\*\*\*</sup>,  
С. К. Гулев<sup>1, \*\*\*\*\*</sup>, Г. Л. Стенчиков<sup>2, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-технологический университет имени короля Абдаллы,  
Тувал, Королевство Саудовская Аравия

\*e-mail: gavr@sail.msk.ru

\*\*e-mail: zol@sail.msk.ru

\*\*\*e-mail: olgar@sail.msk.ru

\*\*\*\*e-mail: marina@sail.msk.ru

\*\*\*\*\*e-mail: gul@sail.msk.ru

\*\*\*\*\*e-mail: georgiy.stenchikov@kaust.edu.sa

Поступила в редакцию 21.12.2021 г.

После доработки 27.12.2021 г.

Принята к публикации 25.02.2022 г.

На основе данных атмосферного реанализа ERA5 и глобального анализа температуры поверхности Мирового океана (HadISST) исследуется климатология летних экстремальных осадков над акваторией Черного моря за период 1979–2021 гг. Проведена детальная диагностика возникновения нескольких эпизодов экстремальных осадков над регионом Черного моря во второй половине июня 2021 года. Показана связь экстремальных осадков с увеличением температуры поверхности моря. Выявлено уменьшение количества сезонов с аномально сильными осадками на фоне увеличения их интенсивности.

**Ключевые слова:** Черное море, климатология атмосферных осадков, экстремальные осадки, ERA5, HadISST, температура поверхности моря

**DOI:** 10.31857/S0030157422030054

### ВВЕДЕНИЕ

Возрастание частоты и интенсивности эпизодов экстремальных осадков в различных регионах Земного шара является характерной особенностью последних десятилетий. Последние отчеты Межправительственной Группы Экспертов по Изменениям Климата (МГЭИК) отмечают, что эти тенденции очевидны для наблюдаемого современного климата, а прогностические оценки, выполненные с помощью глобальных и региональных климатических моделей, свидетельствуют, что экстремальность осадков будет усиливаться [4, 15]. Усиление экстремальности осадков может быть связано как с общим увеличением средней интенсивности осадков, так и с кластеризацией сильных осадков в экстремальные дождевые периоды [22, 23]. В работе [21] показано, что на Европейском континенте в зимний сезон усиление экстремальности, как правило, связано

с общим увеличением осадков, тогда как в летний сезон рост экстремальности происходит преимущественно за счет их кластеризации без увеличения средних интенсивностей и даже без увеличения количества так называемых влажных дней, которые имеют тенденцию группироваться в относительно продолжительные дождевые периоды.

В этом смысле черноморский регион является весьма показательным. В последнее десятилетие здесь регулярно наблюдаются эпизоды сильных экстремальных осадков, приводящих к мощным наводнениям в береговых районах [9, 10, 11]. Наиболее сильными являются наводнения в Новороссийске в 2002 г. и Крымске в 2012 г., приведшие к многочисленным человеческим жертвам и разрушениям прибрежной инфраструктуры. В работе [12] показано, что экстремальные осадки в период 6–7 июля 2012 г., достигавшие значений 150 мм в день (по данным высокоразрешающего

моделирования), были связаны с сильной локальной адвекцией влаги в мощном циклоне, развитие которого было обусловлено аномально высокой температурой поверхности Черного моря. Авторами [12] было отмечено, что повышение температуры поверхности Черного моря играет критическую роль в усилении такого рода явлений за последние десятилетия. Аналогичные результаты были получены и для западного Средиземноморья [17].

В данной работе анализируются эпизоды экстремальных осадков в районе Черного моря во второй половине июня 2021 года, приведшие к сильным наводнениям в Крыму (17–20.06.2021) и Краснодарском крае (24–27.06.2021). Оба эпизода сопровождалась серьезными разрушениями инфраструктуры, нарушением транспортных коммуникаций, отключениями электроэнергии и введением чрезвычайного положения. Эти эпизоды, характеризовавшиеся экстремальными осадками, будут рассмотрены в контексте долгосрочных изменений средних и экстремальных осадков в данном регионе за последние 40 лет.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для долгосрочного климатического анализа нами использовались данные атмосферного реанализа ERA5 [3, 7], созданного Европейским Центром Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF). Это высокоразрешающий реанализ с пространственным разрешением около 30 км и дискретизацией по времени 1 час. Реанализ создавался с помощью спектральной модели Европейского Центра с разрешением T629 в режиме усвоения большого количества данных наблюдений с помощью 4-мерного алгоритма усвоения. В настоящий момент ERA5 является самым современным глобальным реанализом. Качество воспроизведения осадков даже в самых современных реанализах уступает точечным измерениям и сверхвысокому численному моделированию, тем не менее ERA5 зарекомендовал себя как наиболее хорошо согласующийся со спутниковыми измерениями [5, 7] в воспроизведении как средних величин, так и экстремальных осадков [18], поэтому он должен достаточно адекватно воспроизводить климатические сигналы. В настоящей работе использовались ежечасные данные ERA5 о накопленных осадках, которые приводились к суточным накопленным. Кроме того, нами использовались данные наблюдений над осадками на гидрометеорологических станциях (табл. 1) за период экстремальных осадков с 17 по 27 июня 2021 года. Также были привлечены данные спутниковых наблюдений над осадками Глобального спутникового осадкомерного эксперимента [1], которые в целом демонстрируют более реалистичные значения осадков над морем по сравне-

нию с реанализами (например, [5]). Данные GPM (Global Precipitation Measurement) доступны с полчасовым разрешением по времени и разрешением 0.1 градуса по пространству.

Абсолютные значения экстремальных осадков оцениваются с помощью локального порогового значения, соответствующего заданному перцентилю (например, 95%), который определяется или по эмпирическим данным, или на основе их аппроксимации теоретическим распределением [20, 22]. Кроме того, может быть оценена относительная экстремальность осадков, характеризующая вкладом осадков, превышающих заданный перцентиль в месячные или сезонные суммы. В этой работе используется индекс экстремальных осадков  $R95tot$  ([21, 22], который показывает долю экстремальных осадков по сравнению с общим количеством осадков дождливых дней:

$$R95tot = \frac{\sum_{w=1}^w R_{wj} \cdot R_{wn} \geq R_{wn} 95}{R_j}, \quad (1)$$

где  $R_j$  – суммарное количество осадков за период  $j$  (здесь рассматривается только летний сезон: июнь–август),  $R_{wj}$  – количество выпавших осадков за дождливые сутки ( $w$ ). “Дождливыми” считаются сутки, за которые выпало более 1 мм осадков. Пороговым значением является 95-й перцентиль ( $R_{wj}$ ), рассчитанный за весь период (1979–2021 гг.), который, ввиду высокой обеспеченности данными, получен эмпирически с использованием линейной интерполяции. Возможные неопределенности при использовании индекса (1) обсуждались в работе [22]. Нами рассматривались осадки с интенсивностью выше 1 мм/день, что позволяет избежать неопределенностей анализа слабых осадков в реанализе, связанных с эффектом инициализации модели.

Информация о температуре поверхности моря была взята из массива долгосрочного анализа HadISST [10] с пространственным разрешением 1°.

Ниже рассматриваются результаты только для летнего периода: с 1 июня по 31 августа. Осреднения по всему региону Черного моря относятся к области, ограниченной широтами 40°–48° с.ш. и 27°–43° в.д.

## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ОСАДКИ НАД РЕГИОНОМ ЧЕРНОГО МОРЯ В ИЮНЕ 2021 г.

Экстремальные осадки в Крыму и на черноморском побережье Кавказа в период с 17 по 26 июня 2021 года привели к затоплениям Ялты и Геленджика, а также ряда других городов юга России. Экстремальные осадки на юге России были обусловлены аномальным развитием атмо-

**Таблица 1.** 12-часовые накопленные суммы осадков (мм за 12 ч) на гидрометеорологических станциях, по данным реанализа ERA5 и спутниковой миссии GPM за период с 17.06 по 19.06.2021

Станция	Источник данных	17.06 03:00 UTC	17.06 15:00 UTC	18.06 03:00 UTC	18.06 15:00 UTC	19.06 03:00 UTC
Евпатория	Станция	0.9	17	7	22	2
	ERA5	18	11	8.6	6.5	0
	GPM	9.6	7	7.7	7	0
Севастополь	Станция	0	10	28	13	0
	ERA5	8.5	11	12	3	0.2
	GPM	15	26	28	3.3	0
Алушта	Станция	2	12	15	41	0
	ERA5	46	6.3	5.5	1.5	0
	GPM	23	3.6	23.9	0.3	0.2
Ялта	Станция	2	0.6	42	91	0
	ERA5	28	7.5	7.9	2	0
	GPM	13.2	17.2	31.1	0.7	0.3
Керчь	Станция	72	15	0	0	0
	ERA5	17.5	0.7	0.5	0	0
	GPM	61	1.4	0	0	0.1
Тамань	Станция	98	15	0	0	0
	ERA5	12.6	1.3	0.1	0	0
	GPM	55	0.8	0.2	0.4	0.2
Анапа	Станция	78	6	0	0	0
	ERA5	15	0.7	0.1	0	0
	GPM	38	0.2	0	0	0
Геленджик	Станция	0.1	0	0	0	28
	ERA5	14	4.3	0	0	0
	GPM	9.2	0.1	0.3	0	0.1
Сочи, Адлер	Станция	5	12	0	0	0
	ERA5	18	0.1	0	0	0
	GPM	1.5	0	0	0	0

сферной циркуляции. Распределение барических систем привело к развитию блокирующего процесса над центральной частью Европейской территории России и интенсификации циклогенеза в черноморском регионе. Холодный воздух, распространяясь по восточной периферии антициклона, столкнулся с теплой влажной воздушной массой над морской акваторией, что вызвало усиление черноморской ветви высотной фронтальной зоны и развитие интенсивной фронтальной деятельности над Черным морем. Аномально теплая поверхность Черного моря способствовала усилению процессов конвекции и испарения, что обусловило значительное увеличение влагосодержания морской воздушной массы. Таким образом, термодинамические факторы привели к образованию фронтальной волны, из которой

15 июня 2021 г. сформировался быстро углубляющийся влагонасыщенный циклон с давлением в центре 1006 гПа над восточной акваторией Черного моря. Блокирующий антициклон, располагавшийся над центром Европейской территории России, препятствовал продвижению циклона в традиционном северном направлении, вследствие чего он в течение трех дней практически стационарировал над бассейном Черного моря и прибрежными территориями, обусловив катастрофическое выпадение осадков в Крыму и на черноморском побережье Северного Кавказа. Свою роль сыграла и орография региона, способствовавшая усилению глубокой конвекции. В последующие дни циклон медленно смещался в западном направлении на территорию Румынии и Болгарии.

В конце месяца вновь были зарегистрированы обильные осадки одновременно в Крыму и в Краснодарском крае. В Сочи в ночь на 25 июня выпала месячная норма осадков. Больше других от проливных дождей пострадали Ялта, Геленджик, Анапа и Сочи. В ложбине, занимавшей весь причерноморский бассейн, к 23 июня сформировался циклон. Область низкого давления охватила северную акваторию Черного моря, Крымский полуостров, Азовское море и кавказское побережье и принесла обильные осадки в регион. Ситуация стабилизировалась к 29 июня, когда циклон сместился в северные широты, а в Причерноморье распространился гребень высокого давления. В средней тропосфере во второй половине июня над черноморским бассейном располагалась обширная область низкого давления, поддерживающая циклогенез в нижних слоях тропосферы. Следует отметить, что интенсивный циклогенез и связанное с ним экстремальное количество выпавших осадков продолжались в июле и в августе, обеспечив аномальный летний сезон в черноморском бассейне и на юге России.

Идентификация осадков по различным данным во время экстремальных событий представляет собой непростую задачу. Развитие атмосферных процессов показывает, что интенсивные осадки в рассматриваемые периоды были сильно локализованы, что затрудняет прямое сравнение стационарных данных с данными реанализа и спутников. Таблица показывает в качестве примера результаты сопоставления данных для нескольких станций черноморского побережья, обнаруживая достаточно существенные расхождения.

В целом можно отметить качественное согласие стационарных данных, данных реанализа и спутниковых наблюдений, однако количественные различия могут достигать нескольких десятков мм за 12 ч, что свидетельствует о существенной роли конвективных процессов и принципиальной трудности сопоставления стационарных наблюдений с данными реанализа и спутниковых измерений. Хотя в целом процессы формирования экстремальных осадков за счет быстрого развития циклонической деятельности качественно описываются верно, количественные оценки отличаются от реально наблюдавшихся.

Тем не менее, отмечавшаяся интенсивность осадков существенно превышала характерные значения, и суммы осадков за период 2 суток на разных станциях приближались к месячным нормам или превосходили их. Это могло оказать существенное влияние на долгосрочную статистику осадков летнего сезона 2021 года.

## АНАЛИЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ В ИЮНЕ 2021 г. В КОНТЕКСТЕ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОСАДКОВ В ЧЕРНОМОРСКОМ РЕГИОНЕ

Были проведены расчеты долговременной изменчивости средних и экстремальных величин осадков для черноморского региона, причем рассчитывались характеристики как абсолютной, так и относительной экстремальности осадков. На рисунке 1 показана годовая динамика средних за летний сезон (июнь–август) суточных осадков (а) и их аномалий (б), полученных для региона Черного моря по данным реанализа ERA5. Расчет проводился для всего региона Черного моря, показанного на рис. 2а. Хорошо видно, что 2021 год резко выделяется по количеству средних выпавших осадков. За рассматриваемый 43-летний период только 2000 год имеет близкие по количеству выпавших осадков характеристики. Средние осадки за летний сезон 2021 года составляли более 8 мм в сутки, что на 2 мм в сутки больше, чем средние интенсивности за период 1979–2021 гг. Следует отметить (рис. 1), что за рассматриваемый период отмечается тенденция уменьшения количества аномальных сезонов, но при этом усиление интенсивности выпадения осадков каждого аномального сезона. Так, до 2000 года осадки за 12 летних сезонов превысили порог аномального значения, в то время как с 2000 г. аномальных сезонов было всего 8, однако два сезона в этот период (2000 и 2021 гг.) показали существенно более экстремальную интенсивность осадков.

Пространственное распределение индекса экстремальных осадков  $R95tot$  (рис. 2а), усредненно-го за весь период, показывает, что наиболее интенсивные осадки преобладают в прибрежных районах. Особенно большая (до 30%) доля экстремальных осадков приходится на восточное побережье, что связано с орографией и характером летней циклонической активности, обеспечивающей адвекцию влаги [16]. На рис. 2б показан годовой ход величин индекса  $R95tot$  для всей области (сплошная кривая), для полуострова Крым (точки) и для Краснодарского края (пунктир). Видно, что в 2021 г. доля экстремальных осадков в обоих выделенных регионах превысила 40%, чего не отмечается в предыдущие 42 года. Во все годы за период с 1979 по 2020 экстремальность оставалась на уровне 10–25%, и только в 2001 году для региона Краснодарского края она приблизилась к 40%. Для района Крыма максимальная экстремальность отмечалась в 1994 и 1999 гг., когда она превышала 30%, что было тем не менее значительно меньше величин, отмеченных для Крыма в летний сезон 2021 года, когда индекс относительной экстремальности достиг 47% (рис. 2). Это показывает, что кратковременный период экс-

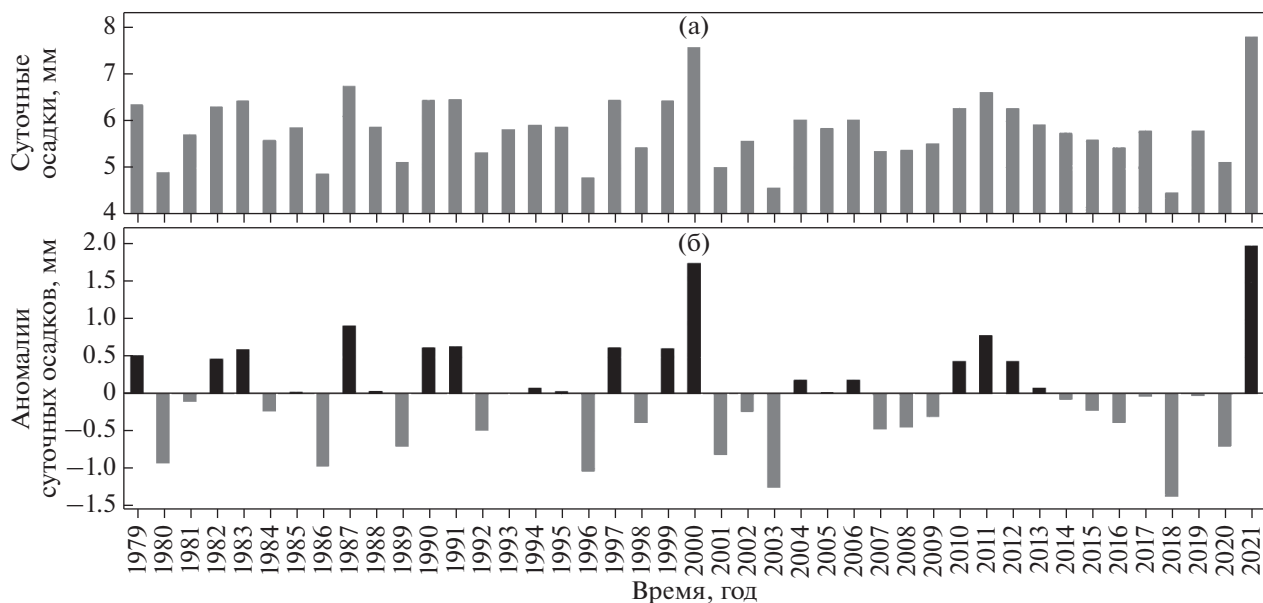


Рис. 1. Годовая динамика средних за летний сезон (июнь–август) суточных осадков (а) и их аномалий (б), полученных для региона Черного моря по данным реанализа ERA5.

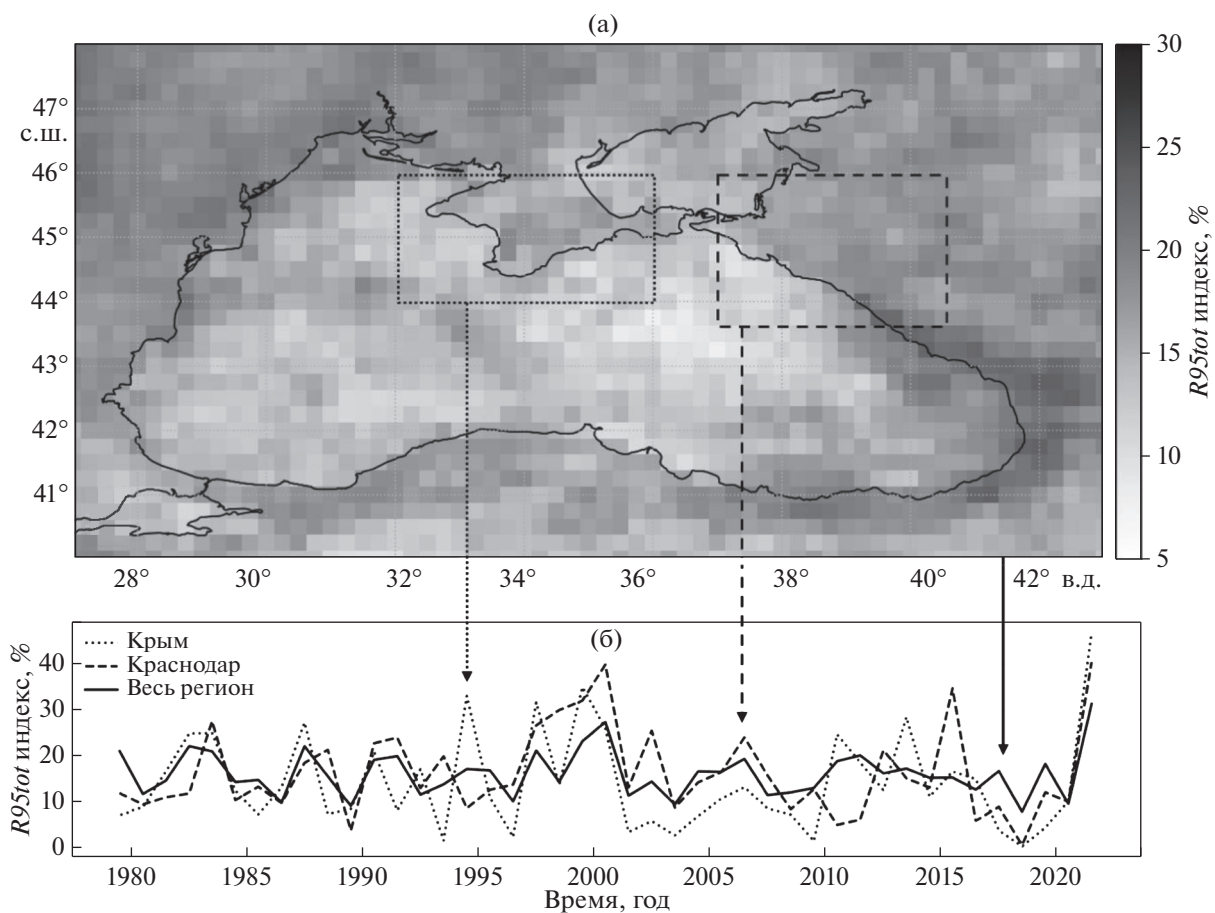
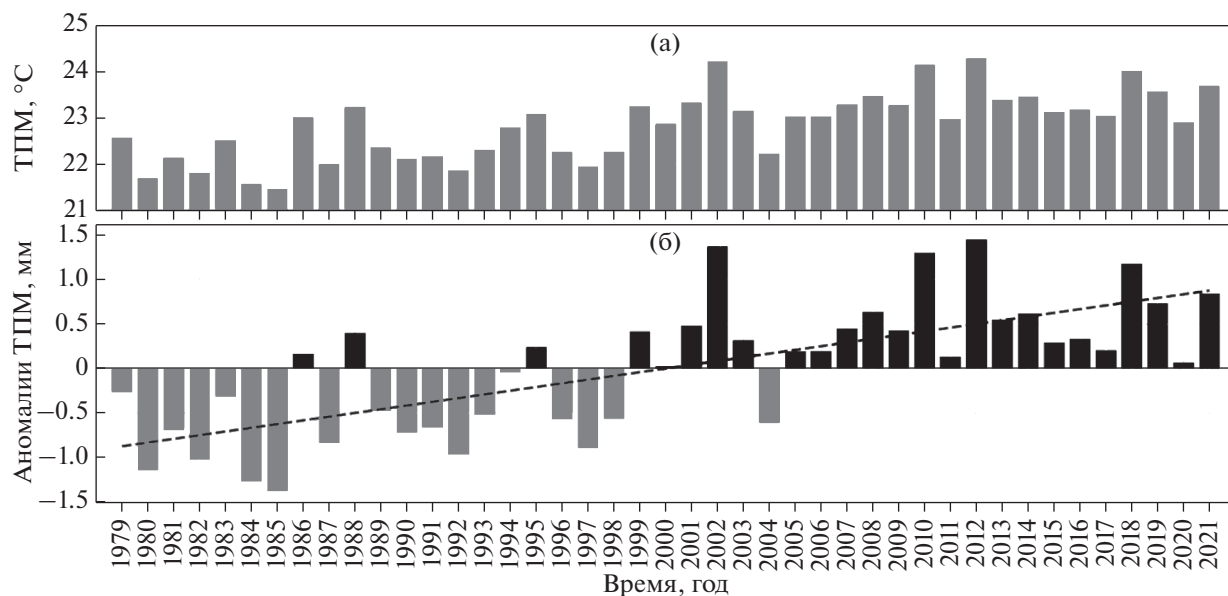


Рис. 2. Распределение индекса экстремальности осадков ( $R95_{tot}$ ). (а) – регион Черного моря, для которого производился расчет индекса  $R95_{tot}$ , (б) – годовая ход величин индекса  $R95_{tot}$  для всей области (сплошная кривая), для полуострова Крым (точка) и для Краснодарского края (пунктир).



**Рис. 3.** Температура поверхности Черного моря (а) и ее аномалии (б) за 43-летний период с 1979 по 2021 гг. На рис. 3б пунктирной линией показан тренд температуры поверхности моря.

тремальных осадков во второй половине июня 2021 года существенно повлиял на долгосрочную статистику экстремальных осадков в черноморском регионе и летний сезон 2021 года стал наиболее аномальным по относительной экстремальности за весь период с 1979 по 2021 гг.

Аномальная интенсивность осадков в летний сезон 2021 года развивалась на фоне экстремально высоких значений температуры поверхности Черного моря. На эту связь указывали авторы работы [8], которые анализировали наводнение в Крымске в 2012 г. В целом концепция такой связи основывается на влиянии температуры поверхности на потоки тепла и испарения с поверхности Черного моря, что, с одной стороны, повышает влагосодержание столба атмосферы, а с другой способствует развитию бароклинности в приземном слое и интенсификации циклонов. Рисунок 3 показывает существенный положительный тренд в температуре поверхности Черного моря (ТПМ) за 43-летний период с 1979 по 2021 гг. По данным массива HadISST, скорость потепления составляет почти 2°C за 43 года (тренд показан пунктирной линией на рис. 3б). Этот результат согласуется с выводами других исследователей [6, 9, 14, 17]. Таким образом, рост температуры поверхности Черного моря может рассматриваться как наиболее важный фактор увеличения частоты и усиления интенсивности экстремальных осадков в регионе. Не менее важным фактором развития рассматриваемых событий является перестройка циркуляции во всем восточноевропейском регионе, развивающаяся на фоне долгопериодных климатических изменений, индикатором которых является рост температуры поверхности Черного моря.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило представить детальную диагностику возникновения нескольких эпизодов экстремальных осадков над регионом Черного моря во второй половине июня 2021 года, которые отличались мощными ливневыми осадками и наводнениями. Показано, что аномалии относительной экстремальности осадков (доли осадков за счет событий, превышающих 95%-ный перцентиль) для всего летнего сезона 2021 года достигали 40% в Краснодарском крае и 47% в Крыму, что превышает все значения, наблюдавшиеся для региона, начиная с 1979 года. Показано, что такие изменения, возможно, связаны с увеличением температуры поверхности моря, составляющим почти 2°C за 43 года.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на детальное исследование локальных механизмов формирования экстремальных осадков с помощью высокоразрешающего негидростатического моделирования [5, 8]. Не менее важной задачей является анализ частоты и интенсивности такого рода событий в исторических интегрированных климатических моделях ансамбля CMIP6, а также в прогностических экспериментах [4]. Этот анализ позволит показать, насколько такие события адекватно воспроизводятся в прогностических экспериментах с климатическими моделями и какова их предсказуемость. Более того, такой анализ может показать, насколько такие события связаны с глобальным трендом потепления, как это сделано для аномально высоких значений температуры [2]. Особый интерес представляет также анализ влияния таких событий на континентальный сток и на

возникновение мощных опресненных плумов на поверхности Черного моря, влияющих на локальную динамику вод и загрязнений прибрежных районов [10–13, 19].

**Источник финансирования.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер соглашения в ГИИС “Электронный бюджет” – 075-15-2021-976 (внутренний № 13.2251.21.0049, идентификационный номер RF – 225121X0049).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bolvin D.T., Braithwaite D., Hsu K. et al.* NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) prepared for: Global Precipitation Measurement (GPM) // National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2018. 26 p.
2. *Ciavarella A., Cotterill D., Stott P. et al.* Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence // *Climatic Change*. 2021. V. 166 (9). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w>
3. Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2021. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
4. *Douville H., Raghavan K., Renwick J. et al.* Water Cycle Changes // In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, 2021. 239 p.
5. *Gavrikov A., Gulev S.K., Markina M. et al.* RAS-NAAD: 40-yr high-resolution North Atlantic atmospheric hindcast for multipurpose applications (new dataset for the regional mesoscale studies in the atmosphere and the ocean) // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2020. № 5 (59). P. 793–817. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0190.1>
6. *Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Serykh I.V., Lebedev S.A.* Climate change in the hydrometeorological parameters of the Black and Azov seas (1980–2020) // *Oceanology*. 2021. V. 61. № 6. P. 900–912. <https://doi.org/10.1134/S0001437021060060>
7. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. № 730 (146). P. 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
8. *Klein Tank A.M.G., Peterson T.C., Quadir D.A. et al.* Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2006. V. 111. № D16. <https://doi.org/10.1029/2005JD006316>
9. *Kostianaia E.A., Kostianoy A.G.* Regional climate change impact on coastal tourism: a case study for the Black Sea coast of Russia // *Hydrology*. 2021. V. 8 (3). 133. <https://doi.org/10.3390/hydrology8030133>
10. *Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Soloviev D.M. et al.* On river plumes along the Turkish coast of the Black Sea // *Ecologica Montenegrina*. 2019. V. 25. P. 63–78. <https://doi.org/10.37828/em.2019.25.7>
11. *Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Soloviev D. et al.* On a relationship between the river runoff and the river plume area in the northeastern Black Sea // *International Journal of Remote Sensing*. 2020. V. 41. № 15. P. 5806–5818. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1685723>
12. *Meredith E.P., Semenov V.A., Maraun D. et al.* Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme // *Nature Geoscience*. 2015. № 8 (8). P. 615–619.
13. *Osadchiev A., Sedakov R.* Spreading dynamics of small river plumes off the northeastern coast of the Black Sea observed by Landsat 8 and Sentinel-2 // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 221. P. 522–533. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.043>
14. *Rayner N.A., Parker D.E., Horton E.B. et al.* Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2003. V. 108. № D14. <https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
15. *Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D. et al.* Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment // In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Cambridge University Press, 2012. P. 109–230.
16. *Tilinina N., Gulev S.K., Rudeva I. et al.* Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses // *Journal of Climate*. 2013. № 17 (26). P. 6419–6438.
17. *Volosciuk C., Maraun D., Semenov V.A. et al.* Rising mediterranean sea surface temperatures amplify extreme summer precipitation in Central Europe // *Scientific Reports*. 2016. (6).
18. *Wehner M., Gleckler P., Lee J. et al.* Characterization of long period return values of extreme daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 1, model evaluation // *Weather and Climate Extremes*. 2020. V. 30. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100283>
19. *Zavialov I.B., Osadchiev A., Zavialov P. et al.* Study of water exchange in the Kerch strait based on historical data and contact measurements in 2019 // *Oceanology*. 2021. № 3 (61). P. 329–337.
20. *Zolina O.* Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: A comparative assessment // *Global and Planetary Change*. 2004. № 1–4 (44). P. 129–161.
21. *Zolina O., Simmer C., Kapala A. et al.* Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2008. V. 113. № D6. <https://doi.org/10.1029/2007JD008393>
22. *Zolina O., Simmer C., Belyaev K. et al.* Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges // *Journal of Hydro-meteorology*. 2009. № 3 (10). P. 701–716.
23. *Zolina O., Simmer C., Belyaev K. et al.* Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years // *Journal of Climate*. 2013. № 6 (26). P. 2022–2047.

## Extreme Precipitations in June 2021 Over the Black Sea in the Context of Their Long Period Climate Change

A. V. Gavrikov<sup>a, #</sup>, O. G. Zolina<sup>a, ##</sup>, O. A. Razorenova<sup>a, ###</sup>, M. P. Aleksandrova<sup>a, ####</sup>,  
S. K. Gulev<sup>a, #####</sup>, G. L. Stenchikov<sup>b, #####</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia*

<sup>#</sup>*e-mail: gavr@sail.msk.ru*

<sup>##</sup>*e-mail: zol@sail.msk.ru*

<sup>###</sup>*e-mail: olgar@sail.msk.ru*

<sup>####</sup>*e-mail: marina@sail.msk.ru*

<sup>#####</sup>*e-mail: gul@sail.msk.ru*

<sup>#####</sup>*e-mail: georgiy.stenchikov@kaust.edu.sa*

On the basis of ERA5 atmospheric reanalysis data and HadISST satellite data on the sea surface temperature, the climatology of summer extreme precipitation over the Black Sea water area is studied for the period 1979–2021. A detailed diagnosis of the occurrence of several episodes of extreme precipitation over the Black Sea region in the second half of June 2021 was carried out. The relationship between extreme precipitation and an increase in sea surface temperature is shown. A decrease in the number of seasons with abnormally heavy precipitation was revealed against the background of an increase in their intensity.

**Keywords:** Black Sea, climatology of atmospheric precipitation, extreme precipitation, ERA5, HadISST, SST