

Верификация данных дистанционного зондирования *GPM IMERG* и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года

А. Е. Анисимов ^{1,✉}, В. В. Ефимов ¹, М. В. Львова ²

¹ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

² Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия

✉ anatolii.anisimov@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 17.09.2020 г., после доработки – 25.11.2020 г.

Цель. Цель работы состоит в оценке качества данных дистанционного зондирования *Integrated Multisatellite Retrievals from GPM (IMERG)* на основе архива наблюдений теплых периодов 2006–2018 гг. и получении количественных оценок параметров атмосферных осадков для территории Крымского региона.

Методы и результаты. Оценка качества данных *IMERG* выполнялась на основе верификации с данными наземной наблюдательной сети Росгидромета, рассматриваемыми в процедуре сопоставления в качестве заведомо более достоверных. Приводятся многолетние статистические характеристики количества, частоты и интенсивности атмосферных осадков для разных климатических зон Крымского полуострова. Рассмотрены пространственная изменчивость летних осадков, коэффициенты временной корреляции и смещение *IMERG* относительно данных наземных наблюдений.

Выводы. Массив *IMERG* характеризуется более слабой пространственной изменчивостью по сравнению с данными наземных наблюдений. Абсолютная погрешность летних сумм осадков невелика для центральной и горной частей Крыма, в то время как осадки на береговых пунктах существенно завышены. Завышение сумм осадков в *IMERG* является в основном следствием их завышенной повторяемости. Временная изменчивость осадков *IMERG* хорошо соответствует данным наблюдений со средним коэффициентом корреляции 0,73. По большинству из рассмотренных метрик в центральных и горных частях Крыма в теплый период *IMERG* существенно превосходит альтернативные массивы данных осадков и с определенными ограничениями может быть использован для практических задач. В то же время отсутствие калибровки над морской акваторией приводит к снижению качеству оценок осадков по *IMERG* в прибрежных областях.

Ключевые слова: *GPM, IMERG, TRMM, E-OBS*, верификация, атмосферные осадки, Крым

Благодарности: исследование изменчивости осадков по данным метеостанций выполнено при финансовой поддержке РФФИ и г. Севастополя в рамках научного проекта № 20-45-920017 «Количественные оценки осадков в Юго-Западном Крыму и Севастополе на базе численного моделирования и радиолокационных наблюдений». Обработка и верификация спутникового массива данных выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0001 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан – атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата».

Для цитирования: Анисимов А. Е., Ефимов В. В., Львова М. В. Верификация данных дистанционного зондирования *GPM IMERG* и количественные оценки атмосферных осадков в Крымском регионе в теплое время года // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 4. С. 490–504. doi:10.22449/0233-7584-2021-4-490-504

Evaluation of *GPM IMERG* Products and Estimation of Warm-Season Precipitation in Crimea

A. E. Anisimov¹, V. V. Efimov¹, M. V. Lvova²

¹ Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russian Federation

² Voeikov Main Geophysical Observatory, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ anatolii.anisimov@mhi-ras.ru

Purpose. The study was aimed at the evaluation of the *Integrated MultisatellitE Retrievals from GPM (IMERG)* remote sensing dataset using ground observations and estimation of the 2006–2018 warm-season precipitation in the Crimean Peninsula.

Methods and Results. Evaluation of the *IMERG* dataset was performed using the meteorological station observations treated as the ground truth. We provided the multiyear statistical characteristics of precipitation amounts, frequency and intensity for different climate zones of the Crimean Peninsula. We considered the spatial variability of summer precipitation, bias and correlation between *IMERG* and the ground observations.

Conclusions. *IMERG* has a weaker spatial variability compared to the ground observations. The warm-season *IMERG* bias is small in the central and mountainous parts of Crimea, whereas the precipitation estimates in the coastal zones are substantially overestimated. The *IMERG* wet bias is mostly caused by the excessive rainfall frequency. The temporal variability of *IMERG* is in good agreement with the observations with an average correlation coefficient 0.73. For most of the metrics considered, warm-season *IMERG* precipitation significantly outperforms the other datasets in the central and mountainous parts of Crimea and could be used for practical tasks with certain precautions. At the same time, due to the lack of calibration over the marine areas, the quality of *IMERG* precipitation estimates in the coastal zones is reduced.

Keywords: *GPM*, *IMERG*, *TRMM*, *E-OBS*, evaluation, atmospheric precipitation, Crimea

Acknowledgements: the study of precipitation variability based on station data was funded by RFBR and Sevastopol municipality, research project No. 20-45-920017 “Quantitative estimates of precipitation in Southwestern Crimea and Sevastopol based on numerical modeling and radar observations”. The processing of remotely sensed data was done within the framework of the state research project No. 0827-2018-0001 “Fundamental studies of the interaction processes in the ocean-atmosphere system conditioning the regional spatial-temporal variability of natural environment and climate”.

For citation: Anisimov, A.E., Efimov, V.V. and Lvova, M.V., 2021. Evaluation of *GPM IMERG* Products and Estimation of Warm-Season Precipitation in Crimea. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(4), pp. 454-467. doi:10.22449/1573-160X-2021-4-454-467

Введение

Оценка компонентов водного баланса и пресноводных ресурсов является одной из важнейших задач гидрологии и геофизики. С ростом населения и развитием экономики для отдельных регионов планеты этот вопрос приобретает исключительную важность. Дополнительным фактором, повышающим значимость проблемы, является изменение климата. Известно, что для ряда регионов планеты ожидается существенное увеличение частоты и продолжительности периодов засухи и, как следствие, – ухудшение ситуации с доступом к пресной воде. Средиземноморье, юго-восточная часть Европы, включая Крымский п-ов, относятся к таким территориям [1]. В настоящий момент Крым уже испытывает серьезные проблемы с водными ресурсами, основная причина которых связана с длительными засушливыми периодами. При этом на территории Крыма отсутствует надлежащая инфраструктура для мониторинга, анализа и прогноза гидрологической обстановки. Существующая

сеть гидропостов и метеорологических станций функционирует, но не развивается; покрытие полуострова наблюдательной сетью осадкомеров (0,09 на 100 км²) остается недостаточным даже по минимальным требованиям Всемирной метеорологической организации для равнинных территорий (0,17 на 100 км²). Для территорий со сложным рельефом требуется гораздо лучшее покрытие. Как следствие, обширные области Крыма остаются без наблюдательных постов: например, отсутствуют осадкомеры на плато Караби-Яйла, которое является водосбором для важных рек, питающих водоемы Восточного Крыма.

Развитие методов дистанционного зондирования существенно расширило возможности гидрологического анализа и прогноза. Это касается инструментов по оценке как влажности почвы [2], так и атмосферных осадков [3], которые являются ключевым компонентом водного баланса. Новейший продукт, основанный на комбинации данных инструментов с нескольких искусственных спутников Земли, – массив данных об осадках *Integrated MultisatellitE Retrievals from GPM (IMERG)*, разработанный совместно NASA и JAXA в рамках программы *Global Precipitation Measurement Mission (GPM)* [4]. Несмотря на то что *IMERG* – новый продукт, он активно используется по всему миру для ряда прикладных задач. Опубликованы работы по верификации *IMERG* для Европы [5], в том числе отдельно для Испании [6] и Нидерландов [7], Китая [8] и многих других регионов [9 и ссылки в этой работе]. Данные *IMERG* также использовались для анализа осадков над поверхностью океана, где стационарные наблюдения отсутствуют [10].

Настоящая работа посвящена верификации массива данных *IMERG* для территории Крымского п-ова за период 2006–2018 гг. Насколько известно авторам, такой анализ спутникового дистанционного зондирования осадков выполняется для территории России впервые. Цель работы – получить количественные оценки осадков массива *IMERG* на различных пространственно-временных масштабах и оценить возможность его применения в качестве инструмента для гидрологического моделирования и верификации атмосферных моделей. Верификация *IMERG* выполняется путем сравнения характеристик осадков, полученных дистанционными методами, с данными наземных наблюдений и основанными на них массивами данных в узлах регулярной сетки. Большинство осадкомерных измерений не использовались при подготовке *IMERG*, они являются, таким образом, независимым источником.

Одна из целей программы *GPM* – уточнение оценок количества осадков в твердой фазе в холодное время года. Следует, однако, отметить, что дистанционные методы измерения осадков в холодный период имеют ряд принципиальных ограничений и часто, при сравнении с данными осадкомерных датчиков, характеризуются более значительными расхождениями по сравнению с летним периодом [11]. Для радиолокационного метода это связано как с особенностью распространения радиоволн в снегопадах (диэлектрическая проницаемость снежных хлопьев в процессе таяния увеличивается в несколько раз и не может быть адекватно осреднена внутри импульсного объема), так и с ошибками осадкомерных измерений. Дождемеры с ветровой защитой улавливают ~70% фактических осадков в виде снега, без ветровой защиты – 50% [12]. Предварительный анализ результатов сопоставления дан-

ных *IMERG* и наземных плевниографов также показал, что количественная оценка осадков согласно *IMERG* в холодное время года характеризуется значительным завышением, поэтому настоящее исследование ограничивается теплым временем года с апреля по сентябрь включительно.

Данные

Спутниковый массив осадков *IMERG* версии *6B-Final*, основанный на одноименном алгоритме программы *GPM*, – самый современный из продуктов дистанционного зондирования [4]. Имея пространственное разрешение $0,1 \times 0,1^\circ$ и временное разрешение 30 мин (в работе используются данные об осадках, аккумулированные за сутки), *IMERG* основан на комбинации множества спутниковых источников. В основе алгоритма лежат данные двух инструментов (двухчастотного радиолокатора и многоканального пассивного радиометра) основного спутника программы – *GPM Core Observatory*, выведенного на орбиту в 2013 г. Кроме этого, в алгоритме *IMERG* аккумулируются данные, полученные с других доступных пассивных микроволновых радиометров, которые подвергаются обработке и калибровке (например, *NOAA AMSU*, *MetOp*, *DMSP* – в настоящее время 10 инструментов) [13]. В областях, не покрытых траекториями спутников с микроволновыми радиометрами, осадки рассчитываются по откалиброванным по *GPM* данным инфракрасных радиометров с геостационарных спутников (*Meteosat*, *GOES*, *Himawari* и др.). Важнейшей составляющей *IMERG* является алгоритм морфинга, в котором для каждой дождевой системы рассчитываются векторы перемещения и для тех шагов по времени, когда данные микроволновых радиометров недоступны, осадки рассчитываются для перемещенных систем. В версии *V06* алгоритм морфинга был обновлен и для расчета векторов применяются данные реанализа *MERRA-2* [14]. Первоначально продукт *IMERG* был доступен начиная с 2014 г., однако в настоящее время аналогичный алгоритм применили к периоду до вывода на орбиту *GPM Core Observatory*, продлив его до 1998 г., когда основным инструментом мониторинга осадков был спутник *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)*. Так же, как *GPM*, *TRMM* имел на борту специальный радиолокатор (первый на то время) для измерения количества осадков и двухканальный микроволновый радиометр. Таким образом, *IMERG* представляет собой непрерывный массив данных об осадках с 1998 г. по настоящее время с унифицированным алгоритмом обработки информации.

В рамках *IMERG* доступны два продукта (набора данных) осадков – с калибровкой по данным наземных осадкомеров и без нее. В настоящей работе мы используем только откалиброванный по наземным наблюдениям вариант. Для калибровки *IMERG* используется массив наземных наблюдений *Global Precipitation Climatology Center (GPCP)* [15]. Калибровка *IMERG* осуществляется по среднемесячным данным осадкомеров и зависит от количества наземных станций в ячейке *GPCP*. При малом покрытии ячейки калибровочный вес *GPCP* снижается.

Массив данных *E-OBS* (в работе используется версия *20e*) основан на кригинге данных метеостанций на равномерную сетку $0,25 \times 0,25^\circ$ [16]. Подобное пространственное разрешение – наилучшее из аналогичных продуктов для территории Крыма. Основное назначение *E-OBS* как наиболее полно-

го и детального продукта для Европы – использование в качестве массива данных для верификации атмосферных моделей на климатических масштабах [17, 18]. Помимо этого, *E-OBS* применяется, наряду со спутниковыми массивами, для гидрологического моделирования [19–21]. Кроме массива *E-OBS* в работе также используется уже упомянутый массив *GPCC* с пространственным разрешением $1 \times 1^\circ$, который применяется в *IMERG* для среднемесячной калибровки (для 2006–2016 гг. используется полная версия, для 2017–2018 гг. – мониторинговая версия *GPCC*). Ранее ни один из этих массивов не применялся для детального анализа изменчивости осадков в Крыму. Качество этих продуктов в значительной степени зависит от количества метеорологических станций, данные с которых передаются для международного обмена и сами по себе нуждаются в отдельной верификации (этот вопрос будет затронут ниже).

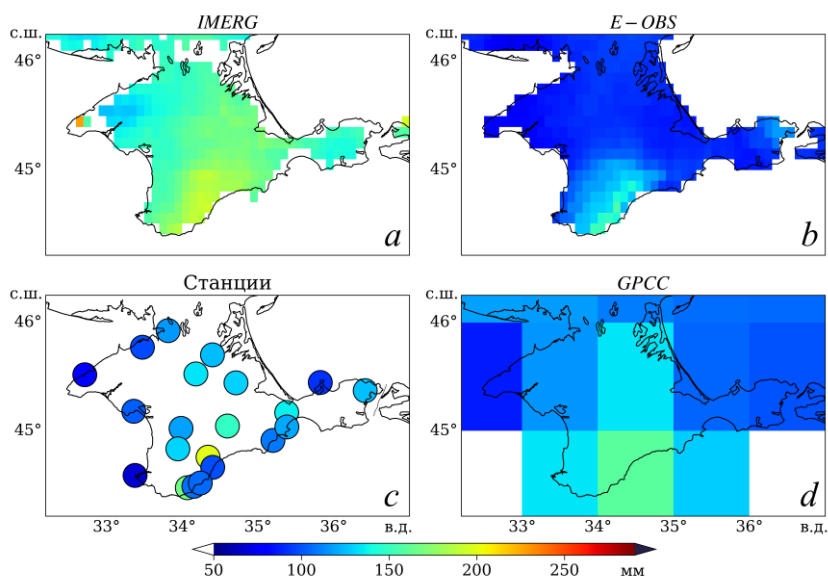
В качестве базового инструмента для верификации используются данные о суммарных суточных осадках, полученные на 21 метеостанции Крымского п-ова за период 2006–2018 гг. Всего в Крыму действуют 24 метеостанции. Данные трех станций были недоступны и не вошли в настоящее исследование (Симферополь (город), Севастополь, Опасное), но для каждой из них на расстоянии нескольких километров имеется «дублирующая» станция, и данные с этих станций используются в анализе (Симферополь (аэропорт), Херсонесский маяк, Керчь).

Для сравнения с наблюдениями на метеостанциях данные *IMERG* и *E-OBS* интерполировались в соответствующий пункт методом обратных взвешенных расстояний с использованием значений в двух ближайших ячейках. При этом ячейки *IMERG*, для которых доля водной поверхности составляла $> 35\%$, были исключены из анализа.

Результаты

Пространственная изменчивость. Для удобства сравнения с ранее опубликованными результатами приведем пространственные распределения количества осадков на территории Крыма за 3-месячный летний период 2006–2018 гг. (рис. 1), а не за весь 6-месячный период, рассматриваемый в данной работе. Согласно карте распределения осадков (рис. 1, *с*), их максимальное количество ожидаемо фиксируется на горных станциях – Ангарский перевал (220 мм) и Ай-Петри (240 мм). Характерной особенностью пространственного распределения осадков по данным наземных наблюдений является контраст между количеством осадков на прибрежных станциях (особенно на западе Крыма, ~90 мм) и в центральной части полуострова (~130 мм). В целом распределение осадков по данным метеостанций хорошо согласуется с известными ранее климатологическими оценками осадков над Крымом [22, 23]. Пространственное разрешение грубого массива *GPCC* (рис. 1, *д*) не позволяет выполнить детальный анализ распределения количества осадков, но тем не менее дает возможность проследить контраст между западной, центральной частью полуострова и районом Южного берега Крыма. Физические механизмы превышения количества осадков в центральных районах Крыма по сравнению с прибрежными заключаются в развитии бризовой циркуляции. Морской бриз в дневное время смещает конвективную облачность в глубь материковой части. В результате дневные осадки чаще развиваются на рас-

стоянии 50–100 км от берега. Так, например, количество осадков в летний период в Симферополе составляет ~120 мм, в то время как в Севастополе – лишь ~70 мм. Детально механизм бризовой циркуляции на примере Крыма рассмотрен в работах [24, 25]. В массиве *E-OBS* (рис. 1, *b*), несмотря на достаточно высокое разрешение, также не отражена детальная структура поля осадков. В целом массив данных *E-OBS* показывает систематическое занижение количества осадков (особенно в центральной части Крыма), за исключением максимума значений в горных районах полуострова. Другие детали, в частности контраст между значениями количества осадков в центральной части полуострова и в береговых зонах, согласно *E-OBS*, не отражены. Небольшой максимум осадков в районе Керченского п-ова, вероятно, обусловлен тем, что метеостанция Керчь – одна из двух вошедших в пул анализа *E-OBS*.



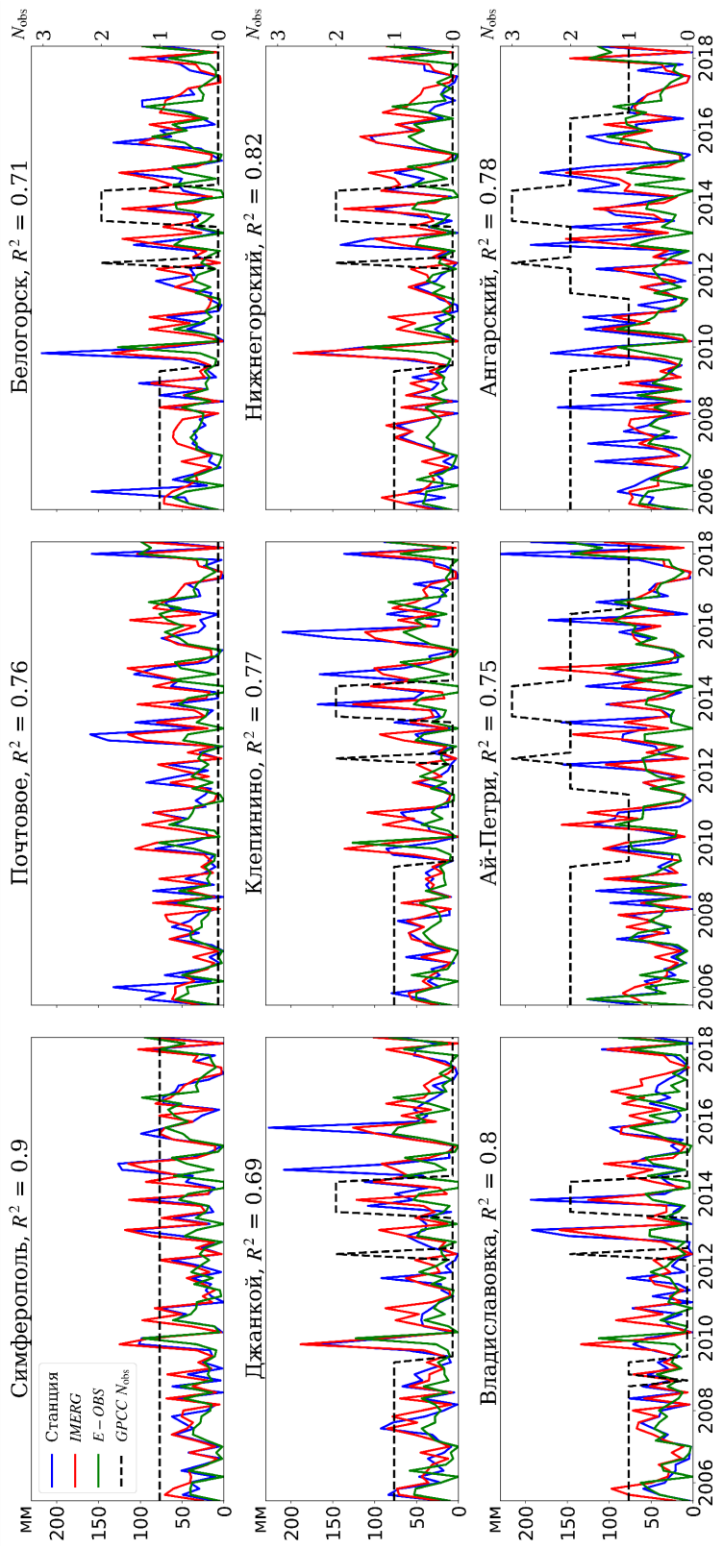
Р и с. 1. Многолетние осредненные за период 2006–2018 гг. пространственные распределения количества осадков в летнее время года по данным *IMERG* (*a*), *E-OBS* (*b*), метеостанций (*c*), *GPCP* (*d*)

Fig. 1. Total summer precipitation climatology for 2006–2018: *IMERG* (*a*), *E-OBS* (*b*), stations (*c*), and *GPCP* (*d*)

Согласно массиву спутниковых данных *IMERG* (рис. 1, *a*), максимум количества осадков также наблюдается в горных районах. Стоит отметить наличие резких градиентов в *IMERG*, согласующихся с границами ячеек *GPCP*, что отражает процедуру калибровки по наземным наблюдениям, выполняемую для *IMERG*. В данных *IMERG* присутствует градиент между западной и центральной частями Крыма, однако он существенно ослаблен за счет завышения количества осадков в районе западного берега Крыма. Если в центральной части полуострова это завышение невелико (~150 мм по сравнению со 130 мм), а в горных пунктах осадки по *IMERG* даже несколько ниже наблюдаемых (~180 мм по сравнению с 200–220 мм), то различия на береговых станциях существенно больше – осадки завышены на 50% и составляют 140 мм.

Значительное завышение оценки осадков *IMERG* в береговой зоне можно расценивать как ожидаемое. В силу отсутствия пунктов стационарных наблюдений калибровка *IMERG* над водной поверхностью не выполняется и в результате качество продуктов *IMERG* оказывается существенно хуже, чем над сушей. Например, в [26] было выполнено сравнение *IMERG* с данными морских буев в Индийском океане и показано значительное завышение количества (на 35–40%) и частоты осадков. Как следствие применяемой процедуры морфинга эта систематическая погрешность также оказывает влияние на береговую зону суши, где и так присутствуют мелкомасштабные эффекты, не фиксируемые спутниковыми инструментами с имеющимся разрешением и приводящие к дополнительным ошибкам. Не приводя иллюстраций, отметим, что в холодное время года завышение количества осадков еще более заметно – это объясняется фундаментальными недостатками радиолокационного метода в оценке твердых состояний (по этой причине в данной работе рассматривается только теплое время года). Важно также отметить, что для гидрологического моделирования принципиальной является временная изменчивость количества осадков в районах водосбора, которые, в отличие от прибрежных частей, имеют большее значение для наполнения рек и водоемов. Для Крымского п-ова это горные и предгорные районы [27]. С учетом указанных особенностей в дальнейшем основное внимание будет уделено осадкам в центральных и горных частях Крыма.

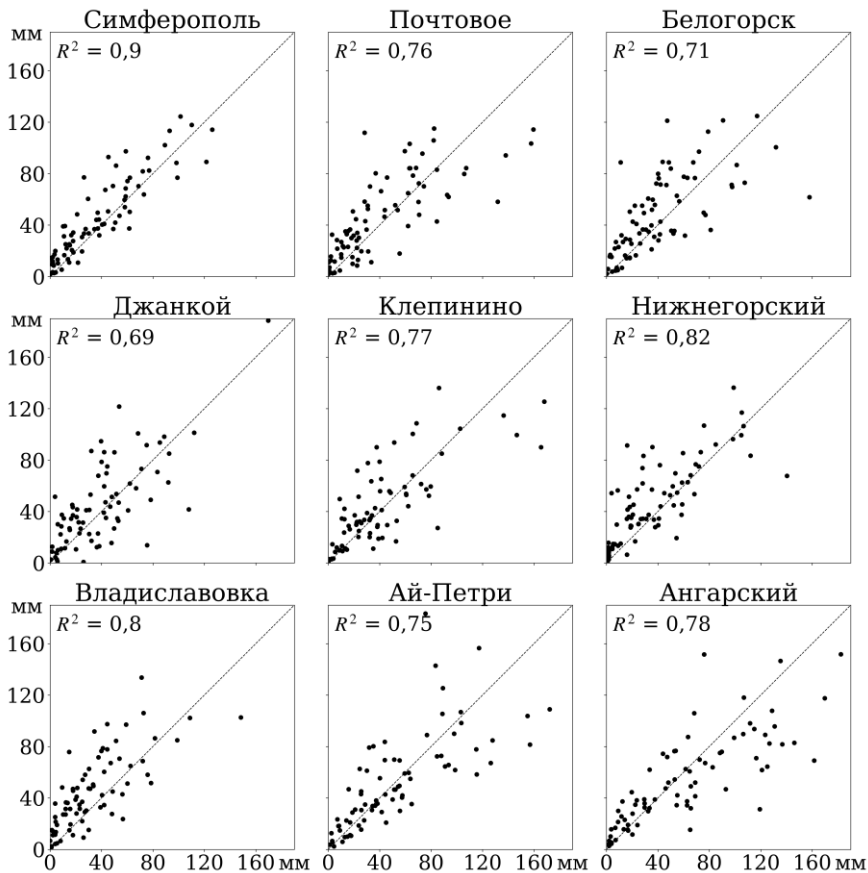
Временная изменчивость. Многолетние ряды суммарного месячного количества осадков на 9 станциях Крыма в центральных и горных районах по данным *IMERG*, *E-OBS* и метеостанций, а также количества метеостанций, которые использовались в *GPCC* (и для калибровки *IMERG*), приведены на рис. 2. Там же указаны корреляционные коэффициенты между данными измерений на метеостанциях и спутниковыми оценками (также рассчитанные по среднемесячным величинам). Как видно, количество станций, учтенных в *GPCC*, снижалось в последние годы по сравнению с предшествующими периодами – для 2018 г. в *GPCC* использовались данные всего четырех крымских станций (Симферополь, Ай-Петри, Черноморское, Керчь). На рис. 3 приведено совместное распределение среднемесячных сумм осадков по данным метеостанций и *IMERG*. В целом данные *IMERG* лучше *E-OBS* согласуются с прямыми измерениями. Заметим, что для некоторых месяцев с интенсивными осадками данные *IMERG* занижены по сравнению с наземными наблюдениями (это особенно выражено для горных станций Ангарский перевал и Ай-Петри), но для большинства случаев количество осадков, согласно *IMERG*, завышено. В свою очередь, данные *E-OBS* существенно занижены. Это уже отмечалось по результатам пространственных распределений – результат является ожидаемым следствием того, что в базу данных *E-OBS* входят всего две крымские станции. Средний коэффициент корреляции по данным 9 метеостанций вдали от береговой зоны составляет 0,78 (по береговым станциям 0,69, средний 0,73). Полученные коэффициенты корреляции в целом сравнимы с приводимыми в других работах [5]. Результаты сравнения *IMERG* с данными на станциях существенно и статистически значимо превосходят *E-OBS* с коэффициентом корреляции 0,45 (по береговым станциям 0,42, средний 0,43).



Р и с. 2. Многолетний ход месячных сумм осадков на 9 станциях по данным *IMERG*, метеостанций, *E-OBS* и количество наблюдений, использованных при подготовке массива *GPCC* (N_{obs}), в теплое время года (апрель – сентябрь) за период 2006–2018 г. (R^2 – коэффициенты корреляции между данными *IMERG* и метеостанций)

Fig. 2. Precipitation time series in 9 locations: *IMERG*, station measurements, *E-OBS*, and the number of gauge observations used in *GPCC* (N_{obs}) for the warm seasons (April – September) in 2006–2018. *IMERG*-station correlation coefficients (R^2) are shown in captions

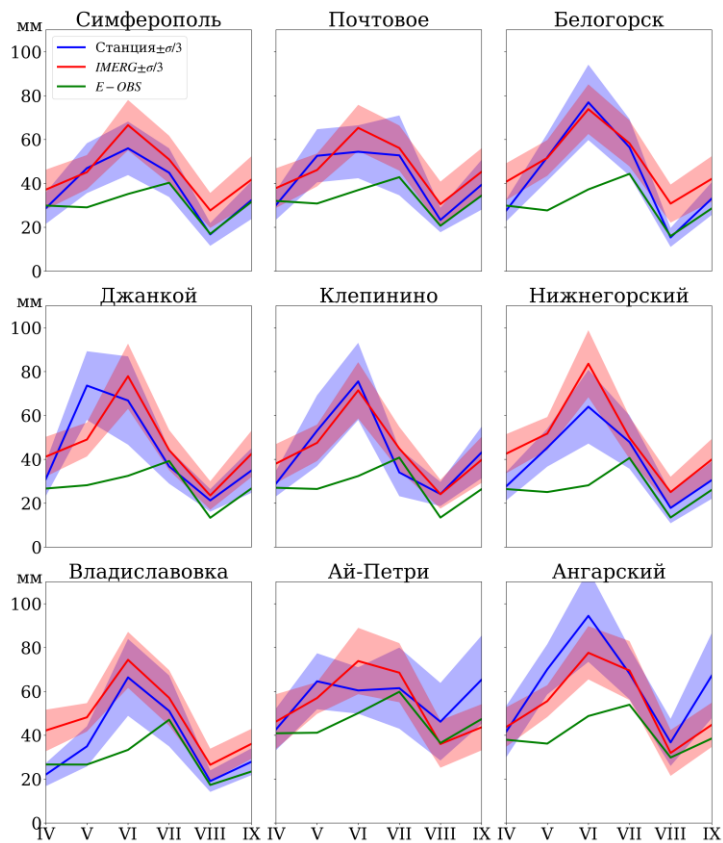
Для оценки качества осадков по *IMERG* до и после введения в эксплуатацию центральной обсерватории *GPM* (а также после увеличения количества других инструментов – пассивных радиометров, которые использовались в *IMERG*) рассмотрим корреляционные коэффициенты за два периода – 2006–2013 и 2014–2018 гг. Согласованность *IMERG* с данными наблюдений находится в прямой зависимости от количества станций, учтенных в *GPCC* [28], поэтому для корректности оценки выберем только те наземные пункты, для которых количество наблюдений *GPCC* за рассматриваемый период не менялось. Указанному условию удовлетворяют 9 станций (Евпатория, Карадаг, Керчь, Почтовое, Симферополь, Ишунь, Раздольное, Херсонесский маяк (Севастополь), Черноморское). Средний коэффициент корреляции с данными на станциях за 2014–2018 гг. (0,77) выше, чем за 2006–2013 гг. (0,70), – этот результат статистически значимый, согласно парному *t*-тесту. К сожалению, многие крымские станции в последние годы перестали передавать данные в базы международного обмена – в результате количество наблюдений, используемых для калибровки *IMERG*, для ряда пунктов снизилось (рис. 2).



Р и с. 3. Совместное распределение месячных сумм осадков по данным *IMERG* (вертикальная ось) и метеостанций (горизонтальная ось)

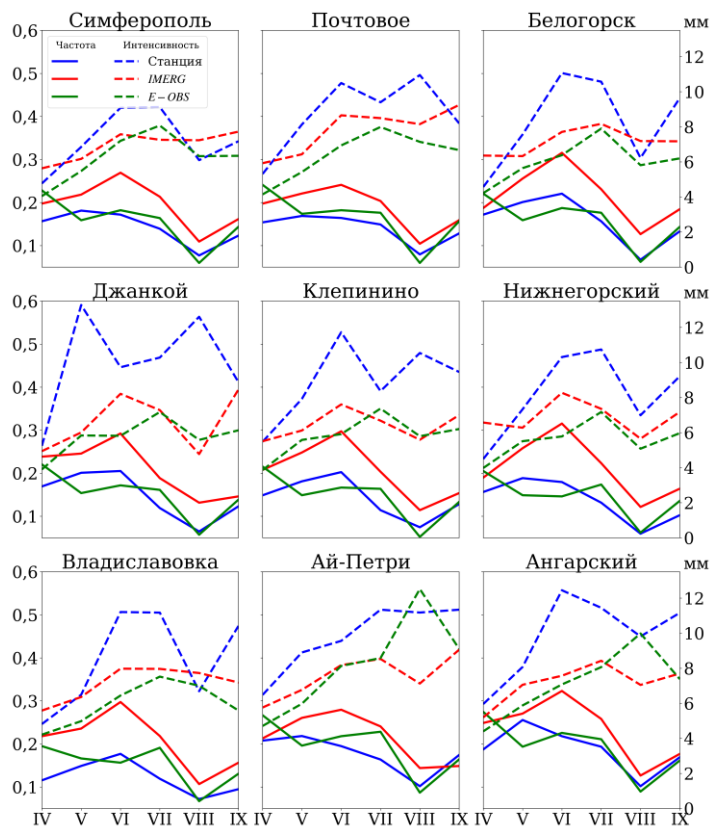
F i g. 3. Scatter plots of *IMERG* (vertical axis) vs station (horizontal axis) monthly precipitation accumulations

На рис. 4 показан годовой ход суммарного месячного количества осадков, на рис. 5 – годовой ход среднемесячной частоты и интенсивности суточных осадков (свыше 1 мм) на 9 пунктах по данным различных источников. Для большинства пунктов, несмотря на большие значения межгодовой изменчивости (стандартное отклонение составляет 70–80% от среднего значения осадков по обоим массивам), многолетний ход осадков *IMERG* соответствует наблюдениям. По данным *IMERG*, максимум осадков теплого времени года приходится на июнь, минимальные значения ожидаемо фиксируются в августе. Абсолютные значения среднемесячных осадков в *IMERG* несколько завышены по сравнению с данными наблюдений, за исключением горных пунктов Ай-Петри и Ангарский перевал – это контрастирует с отмеченным выше занижением осадков, связанным с пиковыми эпизодами. По данным массива *E-OBS*, годовой ход не соответствует отмеченному: максимум количества осадков приходится на июль, при этом максимальные значения существенно занижены по сравнению со стационарными измерениями.



Р и с. 4. Годовой ход среднемесячных сумм осадков в теплое время года (апрель – сентябрь) за период 2006–2018 гг. на 9 станциях по данным *IMERG*, метеостанций и *E-OBS* (затемненные участки – интервалы одной трети стандартного отклонения)

F i g. 4. Annual variation of monthly precipitation accumulations averaged for the warm seasons (April – September) in 2006–2018: *IMERG*, station measurements, and *E-OBS*. Shaded is the interval of one-third of standard deviation

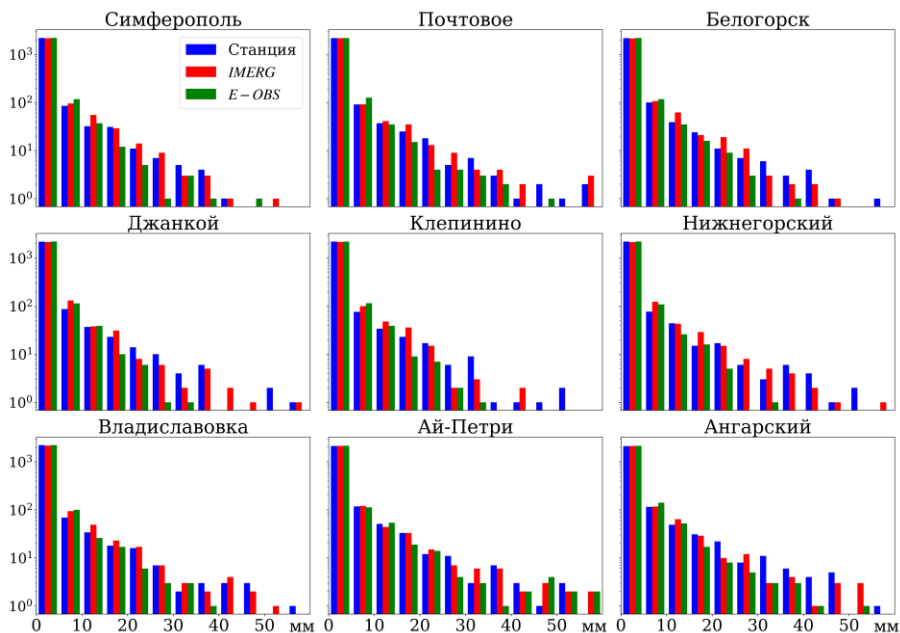


Р и с. 5. То же, что на рис. 4, для среднемесячной частоты и интенсивности суточных сумм осадков, рассчитанных с порогом $1 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$

Fig. 5. The same as on Fig. 4, but for the monthly-averaged daily precipitation frequency and intensity calculated using $1 \text{ mm} \cdot \text{day}^{-1}$ threshold

Рассмотрим более детально годовой ход, суточную частоту и интенсивность осадков (рис. 5). Максимум среднемесячной частоты осадков по данным наблюдений меняется от пункта к пункту, в то время как по данным *IMERG* он всегда соответствует июню, как и максимум количества осадков (рис. 4). В целом годовой ход частоты и интенсивности осадков по *IMERG* достаточно стабилен для всей территории Крыма и слабо меняется от пункта к пункту, демонстрируя уже отмеченную недооценку локальных мелкомасштабных особенностей осадков в *IMERG*. Особенности многолетнего хода частоты и интенсивности осадков объясняют видимое противоречие с положительным смещением сумм осадков в *IMERG*, в то время как пиковые значения количества осадков в отдельные месяцы занижены. Видно, что средняя интенсивность осадков в большинстве пунктов по данным наблюдений (8,8 мм) выше, чем по массивам *IMERG* (7,1 мм) и *E-OBS* (6,3 мм), особенно на станциях в степной зоне (Джанкой, Нижнегорский, Клепино, Владиславовка). Среднемесячная же суточная частота осадков выше 1 мм, напротив, по данным *IMERG* несколько завышена (0,21 по сравнению с 0,15 и 0,16 по данным станций и *E-OBS* соответственно). Таким образом, по данным массива *IMERG* фиксируется выпадение более частых, но менее интенсивных осадков.

Данный вывод подтверждается также по гистограммам суточных сумм осадков (рис. 6). Дни с осадками до $20 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$ отмечаются в *IMERG* более часто, что дает основной вклад в повышенную повторяемость. С другой стороны, дни с осадками $> 20\text{--}25 \text{ мм} \cdot \text{сут}^{-1}$ в *IMERG* встречаются реже, чем по данным наблюдений, и как результат – сниженная средняя интенсивность. Количество дней с сильными осадками по данным *E-OBS* (за исключением пункта Ай-Петри) намного меньше, чем по данным двух других массивов. Этот результат согласуется с [28], где на примере Китая была показана существенная зависимость *IMERG* от интенсивности осадков: недооценка сильных осадков и переоценка слабых.



Р и с. 6. Гистограммы суточных сумм осадков в теплое время года (апрель – сентябрь) за период 2006–2018 гг. на 9 станциях по данным *IMERG*, метеостанций и *E-OBS*

F i g. 6. Histograms of daily precipitation accumulations in 9 locations for the warm seasons (April – September) of 2006–2018: *IMERG*, station measurements, and *E-OBS*

Заклучение

Затронутые в данной работе вопросы имеют непосредственное практическое приложение. Потенциальным инструментом мониторинга и прогноза доступности водных ресурсов могла бы служить комплексная численная система, включающая либо отдельный гидрологический компонент, либо модель численного прогноза погоды с гидрологическим модулем. Ключевыми звеньями такой системы должны быть качественные поля атмосферных осадков. Данные спутникового дистанционного зондирования могут быть самостоятельным источником входных полей атмосферных осадков или инструментом для их верификации. В любом случае в отсутствие наземной наблюдательной сети с должной густотой данные дистанционного зондирования выступают в роли крайне важного источника информации.

По результатам верификации массива данных дистанционного зондирования *IMERG* для территории Крымского п-ова можно подвести следующие итоги.

1. Характерная черта распределения осадков в Крыму в летние месяцы – меньшие суммы осадков в западных и восточных прибрежных районах по сравнению с внутренними степными областями. Это является основным источником расхождений между измерениями на метеостанциях и дистанционными данными: по сравнению с наблюдениями в массиве *IMERG* гораздо слабее выражены пространственные градиенты между прибрежными и внутренними областями Крыма. В то время, как для материковой части Крыма смещение летних сумм осадков невелико (+15% в центральной части полуострова, –10% в горных районах), для западного берега Крыма дистанционные оценки осадков существенно (до 50%) завышены, что приводит к сглаживанию контрастов между центральной частью полуострова и береговыми зонами. Тем не менее относительные погрешности ошибок в *IMERG* и в *E-OBS* сопоставимы.

2. Средний коэффициент временной корреляции с данными наблюдений в 21 пункте по *IMERG* (0,73) значительно превосходит *E-OBS* (0,43). Для периода эксплуатации спутника *GPM Core Observatory* (с 2014 г.) корреляционные коэффициенты значимо выше, чем для предшествующего периода. Коэффициенты корреляции на береговых станциях (0,69) снижены по сравнению с центральными и горными районами (0,79). Так же, как и для смещения, это связано с системными недостатками алгоритма *IMERG*, что уже отмечалось в других работах.

3. Максимум полугодового хода осадков в *IMERG* на материковых станциях корректен и лучше соотносится с наблюдениями по сравнению с *E-OBS*. Однако необходимо отметить завышенную частоту суточных осадков (на 30–40%) и, напротив, сниженную на 20% интенсивность. Таким образом, в *IMERG* фиксируются более слабые, но более частые осадки. Это заметно как по среднемесячным суммам осадков, так и по суточным нормам *IMERG*, когда пиковые значения оказываются сглажены. Ошибка в частоте осадков приводит к их накоплению в виде излишка среднемесячных сумм, что выражается в положительном суммарном смещении.

Из рассмотренных результатов можно сделать вывод, что качество спутникового массива данных *IMERG* существенно превосходит качество наилучшего из альтернативных источников (*E-OBS*) и, таким образом, *IMERG* имеет существенно лучшую перспективу для практического применения. Необходимо отметить, что Крымский п-ов является достаточно небольшим по площади (по сравнению с другими территориями, применительно к которым анализировался *IMERG*), практически островным объектом со сложным рельефом, что само по себе существенно усложняет возможность использования инструментов дистанционного зондирования. Тем не менее хорошая временная динамика и неплохое качество данных *IMERG* для горных районов, выступающих в роли водосборов, позволяет допустить ограниченную применимость массива как поля форсинга для численного моделирования и для анализа изменчивости процессов осадкообразования в Крыму. Для преодоления ошибок в воспроизведении пространственной структуры полей осадков (в частности завышенных осадков в береговой зоне) могут быть использованы техники пространственной коррекции смещения. В числе

основных проблем, которые ограничивают возможности применимости в Крыму как *IMERG*, так и массивов, основанных на кригинге данных наземных наблюдений, можно отметить низкое покрытие территории Крыма сетью метеостанций и недостаточную доступность данных для исследовательского и экспертного сообщества, что значительно ограничивает качество в том числе и продуктов спутникового зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Future global meteorological drought hot spots: A study based on CORDEX Data / J. Spinoni [et al.] // *Journal of Climate*. 2020. Vol. 33, no. 9. P. 3635–3661. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0084.1>
2. The soil moisture active passive (SMAP) mission / D. Entekhabi [et al.] // *Proceedings of the IEEE*. 2010. Vol. 98, no. 5. P. 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
3. *Maggioni V., Massari C.* On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review // *Journal of Hydrology*. 2018. Vol. 558. P. 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.039>
4. The Global Precipitation Measurement Mission / A. Y. Hou [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2014. V. 95, no. 5. P. 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
5. Assessment of IMERG precipitation estimates over Europe / A. Navarro [et al.] // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, no. 21. P. 2470. <https://doi.org/10.3390/rs11212470>
6. The contribution of rain gauges in the calibration of the IMERG product: Results from the first validation over Spain / F. J. Tapiador [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. 2020. Vol. 21, no. 2. P. 161–182. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0116.1>
7. First-year evaluation of GPM rainfall over the Netherlands: IMERG day 1 final run (V03D) / M. R. Gaona Rios [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. 2016. Vol. 17, no. 11. P. 2799–2814. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0087.1>
8. Early assessment of integrated multi-satellite retrievals for global precipitation measurement over China / H. Guo [et al.] // *Atmospheric Research*. 2016. Vol. 176. P. 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.020>
9. *Wang H., Yong B.* Quasi-Global evaluation of IMERG and GSMaP precipitation products over land using gauge observations // *Water*. 2020. Vol. 12, no. 1. P. 243. <https://doi.org/10.3390/w12010243>
10. *Гавриков А. В.* Оценка качества воспроизведения осадков над Северной Атлантикой и влияния гидростатической аппроксимации в атмосферной модели WRF-ARW // *Океанология*. 2017. Т. 57, № 2. С. 261–267. <https://doi.org/10.7868/S0030157417020046>
11. Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses and satellite- and gauge-based estimates over western and central Europe / M. Lockhoff [et al.] // *Journal of Hydrometeorology*. 2019. Vol. 20, no. 6. P. 1123–1145. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1>
12. *Koistinen J., Saltikoff E.* Experience of customer products of accumulated snow, sleet and rain // *COST 75 Advanced Weather Radar Systems, International Seminar, Locarno, Switzerland, 23–27 March 1998* / Ed. C.G. Collier. – Luxembourg: European Commission, 1998. P. 397–406.
13. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) / G. J. Huffman [et al.]. NASA, 2020. 35 p. URL: <https://gpm.nasa.gov/resources/documents/algorithm-information/IMERG-V06-ATBD> (date of access: 14.09.2020).
14. IMERG V06: Changes to the morphing algorithm / J. Tan [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2019. Vol. 36, iss. 12. P. 2471–2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>

15. GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle / U. Schneider [et al.] // Theoretical and Applied Climatology. 2014. Vol. 115. P. 15–40. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>
16. An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets / R. G. Cornes [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2018. Vol. 123, no. 17. P. 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
17. Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble / S. Kotlarski [et al.] // Geoscientific Model Development. 2014. Vol. 7. P. 1297–1333. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
18. *Алешина М. А., Семенов В. А., Чернокульский А. В.* Исследование роли глобальных и региональных факторов в изменении экстремальности летних осадков на Черноморском побережье Кавказа с использованием результатов экспериментов с моделью климата // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2019. Т. 3. С. 59–75. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2019-3-59-75>
19. Evaluation of gridded meteorological datasets for hydrological modeling / M. Raimonet [et al.] // Journal of Hydrometeorology. 2017. Vol. 18, no. 11. P. 3027–3041. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0018.1>
20. Testing the hydrological coherence of high-resolution gridded precipitation and temperature data sets / L. Laiti [et al.] // Water Resources Research. 2018. Vol. 54, no. 3. P. 1999–2016. <https://doi.org/10.1002/2017WR021633>
21. How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: A verification study over the Mediterranean area / S. Camici [et al.] // Journal of Hydrology. 2018. Vol. 563. P. 950–961. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.067>
22. Климатический атлас Крыма. Симферополь : Таврия-Плюс, 2000. 118 с.
23. Клімат України. Київ : Изд-во Раевского, 2003. 343 с.
24. *Ефимов В. В., Комаровская О. И.* Бризовая циркуляция в атмосфере Крымского региона // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 77–87. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2015-6-77-87>
25. *Ефимов В. В.* Численное моделирование бризовой циркуляции над Крымским полуостровом // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2017. Т. 53, № 1. С. 95–106. <https://doi.org/10.7868/S0002351517010047>
26. How accurate are satellite estimates of precipitation over the north Indian Ocean? // S. Prakash [et al.] / Theoretical and Applied Climatology. 2018. Vol. 134. P. 467–475. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2287-2>
27. *Дунаева Е. А., Коваленко П. И.* Типизация бассейнов рек Крыма по агроландшафтам и экологической нагрузке на них // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации*. 2013. Т. 12, № 4. С. 157–167.
28. How does the evaluation of the GPM IMERG rainfall product depend on gauge density and rainfall intensity? / F. Tian [et al.] // Journal of Hydrometeorology. 2018. Vol. 19, iss. 2. P. 339–349. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0161.1>

Об авторах:

Анисимов Анатолий Евгеньевич, старший научный сотрудник, отдел взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5530-5608**, **ResearcherID: ABA-1705-2020**, **Scopus Author ID: 42561044300**, anatolii.anisimov@mhi-ras.ru

Ефимов Владимир Васильевич, заведующий отделом взаимодействия атмосферы и океана, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-4262-9902**, **ResearcherID: P-2063-2017**, **Scopus Author ID: 7202138991**, vefim38@mhi-ras.ru

Львова Маргарита Владимировна, заведующая лабораторией научно-методических основ радиометеорологических наблюдений, отдел геофизического мониторинга и исследований, ФГБУ «ГГО» (194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7), rita_lvova@mail.ru