

УДК 556.5.072

DOI 10.17513/use.38434

ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ НАВОДНЕНИЙ: ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕАНАЛИЗ

¹Федоровский А.С., ²Кролевецкая Ю.В.¹ФГБУ «Дальневосточное отделение Российской академии наук», Владивосток,
e-mail: as.fedorovskiy@mail.ru;²ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Владивосток

Решение проблемы отсутствия данных наблюдений за стоком рек в последнее время связывается с применением глобальных гидрологических моделей для его восстановления. Цель исследования – рассмотреть основные принципы работы, недавно созданной за рубежом, Глобальной системы предупреждения наводнений (Global Flood Awareness System) по генерации гидрологического реанализа, проанализировать оценку точности моделируемого стока, включая некоторые реки в Российской Федерации. В основе системы лежит полуавтоматическая процедура калибровки крупномасштабной гидрологической модели, реализованная с использованием наблюдений за расходами воды рек по всему миру и реанализа атмосферы в качестве входных метеоданных. На начало 2025 года разработаны четыре основные версии реанализа, воспроизводящие средние суточные расходы воды с 1979 года по настоящее время на реках с площадью водосбора от 500 км². Наиболее высокие оценки качества моделирования, в соответствии с показателем Клинга – Гупты, у четвертой версии реанализа. Для всех использованных бассейнов медианное значение показателя составляет 0,74 с межквартильным размахом от 0,46 до 0,85. На территории Российской Федерации для 114 из 124 створов, использованных для оценки, значения показателя превышают 0,6. Качество гидрологического моделирования улучшилось в этой версии, в том числе за счет более высокого пространственного разрешения (около 5 км), тогда как в предыдущих версиях использовалась сетка с шагом около 10 км. Улучшена структура и выполнено распараллеливание процедур в гидрологической модели. В целом система эффективна в 86% водосборов по всему земному шару в соответствии с показателем Клинга – Гупты. Однако эффективность значительно варьируется в зависимости от местоположения, поэтому требуется тестирование данных реанализа стока перед практическим применением.

Ключевые слова: водосбор, речной сток, гидрологический реанализ, климатический реанализ, моделирование речного стока

GLOBAL FLOOD AWARENESS SYSTEM: HYDROLOGICAL REANALYSIS

¹Fedorovskiy A.S., ²Krolevetskaya Yu.V.¹Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok,
e-mail: as.fedorovskiy@mail.ru;²Russian Research Institute for Complex Use and Protection of Water Resources,
Far Eastern Branch, Vladivostok

The solution to the problem of a lack of river flow observations has recently been associated with the use of global hydrological models to restore runoff (hydrological reanalysis). The purpose of the study is to examine the basic principles of operation of the Global Flood Awareness System, recently established abroad, for generating hydrological reanalysis and to analyze estimates of the accuracy of river discharges modeled, including some rivers in the Russian Federation. The system is based on a semi-automatic calibration procedure for a large-scale hydrological model, implemented using river observations worldwide and atmospheric reanalysis as input weather data. At the beginning of 2025, four main versions of the reanalysis have been developed, generating the daily discharges from 1979 to the present on rivers with a watershed area of 500 km² or more. Performance is best, according to the Kling-Gupta indicator, in the fourth version of the reanalysis. For all watersheds used, the median value of the indicator is 0.74 with an interquartile range from 0.46 to 0.85. In the territory of the Russian Federation, for 114 of the 124 sites used for the assessment, the indicator values exceed 0.6. The quality of hydrological modeling has improved, including due to higher spatial resolution (about 5 km), whereas in previous versions a grid with a step of about 10 km was used. Also, the structure has been improved and procedures have been parallelized in the hydrological model. Overall, the system is effective in 86% of watersheds around the globe, according to the Kling-Gupta indicator. However, the effectiveness varies significantly depending on the location, so testing of reanalysis data is required before practical application.

Keywords: watershed, river discharges, hydrological reanalysis, climate reanalysis, river flow modeling

Введение

Проблема недостаточности или отсутствия данных по стоку рек является ключевой при решении большинства водохозяйственных задач. Решение этой проблемы

в последнее время связывается с применением глобальных гидрологических моделей для восстановления рядов речного стока за длительный исторический период (гидрологический реанализ) [1-3]. Не-

смотря на значительный прогресс в этом направлении, существуют значительные расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми расходами воды рек, которые связаны в основном с пространственным разрешением и качеством входных метеорологических данных, недоучетом или существенным упрощением ряда моделируемых гидрологических процессов, влиянием хозяйственной деятельности [4]. Разработанная недавно за рубежом Глобальная система предупреждения наводнений (Global Flood Awareness System – GloFAS) во многом лишена этих недостатков [5; 6].

В основе GloFAS лежит полуавтоматическая процедура калибровки крупномасштабной гидрологической модели LISFLOOD, реализованная с использованием базы данных наблюдаемых расходов воды рек по всему миру и реанализа атмосферы ERA5 [7] в качестве входных метеоданных. Кроме основной задачи по прогнозированию речного стока, которая находится за рамками настоящей статьи, откалиброванная модель генерирует непрерывный многолетний ряд ежедневных расходов воды, называемый далее реанализ GloFAS-ERA5, в реках площадью от 500 км² (в версии системы v4) с практически глобальным пространственным охватом [5].

Цель исследования – рассмотрение основных принципов работы системы GloFAS по генерации средних суточных расходов воды рек, краткий анализ точности оценок стока, включая территорию Российской Федерации, а также привлечение внимания специалистов по тестированию данных реанализа стока и использованию его для решения прикладных задач.

Материалы и методы исследования

В основе работы лежат зарубежные статьи, опубликованные разработчиками системы GloFAS, описывающие принципы работы системы, методы оценки ее эффективности на основе сопоставления рассчитанных расходов воды с наблюдаемыми на реках по всему миру. Также использованы самые актуальные данные, полученные с официальных порталов системы GloFAS (www.globalfloods.eu; <https://ewds.climate.copernicus.eu>), ее основного заказчика: Службы управления чрезвычайными ситуациями Copernicus (Copernicus Emergency Management Service – CEMS) (<https://emergency.copernicus.eu>), и другие сведения о системе GloFAS, опубликованные в сети Интернет.

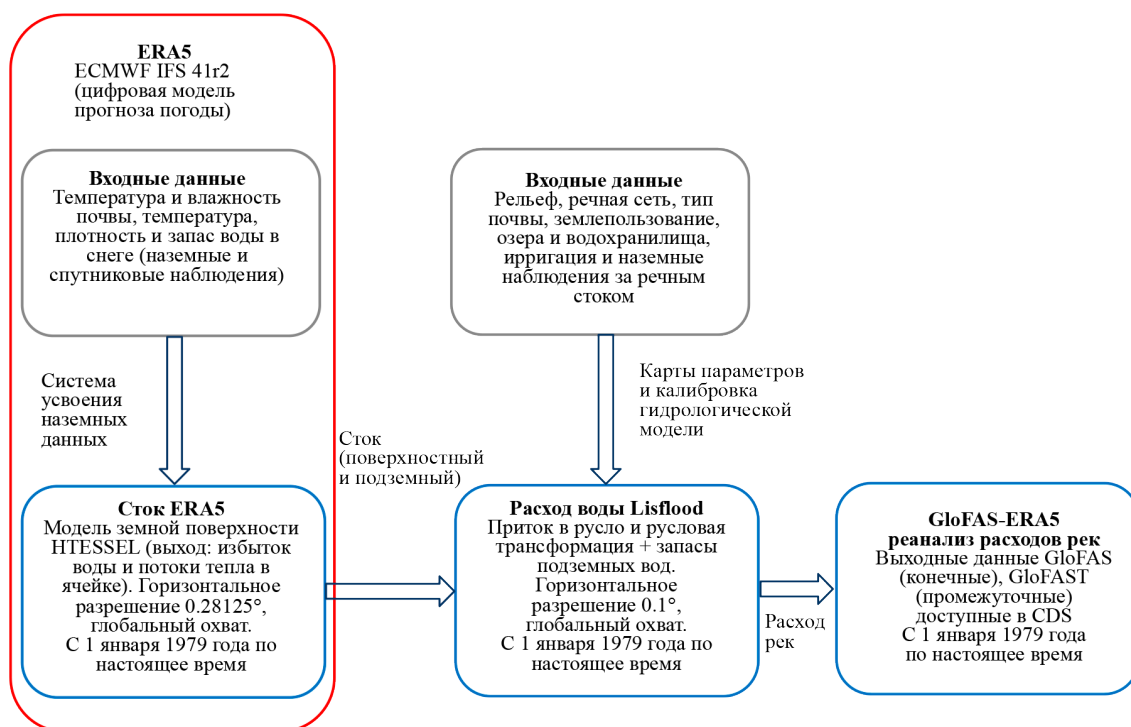
Результаты исследования и их обсуждение

Глобальная система предупреждения наводнений GloFAS осуществляет оперативный мониторинг и прогнозирование наводнений по всему миру. Система генерирует большой объем данных, в том числе реанализ речного стока за длительный период, прогнозы наводнений, сезонные прогнозы и другие данные [5; 6]. Она постоянно совершенствуется, в связи с чем появляются различные ее версии. Система GloFAS v1.0 была введена в эксплуатацию в марте 2018 г. в тестовом режиме, став полностью работоспособной и поддерживаемой круглосуточно в апреле 2018 г. В ноябре 2018 г. GloFAS обновлена до версии 2.0. В мае 2021 г. введена в эксплуатацию версия 3.1. Далее выпуски следовали примерно по две версии в год. На начало 2025 года актуальна версия 4.3 [8].

Реанализ речного стока GloFAS-ERA5 представляет собой опорный набор (ряд) средних суточных расходов воды, восстановленных (моделированных) с 1979 по начало 2025 года (на текущий момент). Эти данные используются для дальнейших расчетов и прогнозов речного стока, а также могут применяться самостоятельно. Данные покрывают территорию суши Земли, за исключением Антарктиды, с разрешением горизонтальной сетки, в зависимости от версии, от 0,1° (приблизительно 11 км на экваторе) до 0,05° (приблизительно 5 км на экваторе) и охватывают период с 1 января 1979 года до настоящего времени с задержкой в 2–5 дней. Моделированные данные представляют собой средние суточные расходы воды (м³/с) в реках по всему миру. Один файл содержит средний расход воды за сутки во всех анализируемых реках. Новый, существенно обновленный набор данных гидрологического реанализа GloFAS-ERA5 v4, включает ежедневные карты расходов воды по всему миру с разрешением сетки 0,05° [8].

Реанализ речного стока создается путем объединения модели стока воды на поверхности суши, входящей в состав реанализа климата ERA5 [7], с гидрологической русловой моделью LISFLOOD [9]. Схема ключевых компонентов в подготовке реанализа GloFAS-ERA5 v2.1 представлена на рисунке.

Реанализ климата ERA5 генерируется моделью ECMWF IFS 41r2, принадлежащей Службе по изменению климата Copernicus (Copernicus Climate Change Service – C3S) [10].



Основные компоненты системы GloFAS-ERA5 v2.1
Источник: составлено авторами на основе источника [5]

В рамках проекта ERA5 генерируется реанализ, который включает ежечасные выходные данные с задержкой в несколько дней, что позволяет с ноября 2018 года моделировать речной сток в оперативном режиме с задержкой от 2 до 5 суток. Сток в системе ERA5 рассчитывается на основе модели земной поверхности (Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land – HTESSEL). HTESSEL вычисляет потоки тепла и влаги на поверхности суши, изменение температуры и влажности почвы, а также высоту снежного покрова. В каждой ячейке сетки ERA5 превышение количества воды, поступающей в виде дождя и/или снеготаяния, над впитыванием воды в почву формирует поверхностный сток, остальная часть просачивается в четырехслойную почвенную колонку [11].

Пространственно распределенная частично физически обоснованная гидрологическая модель речного стока LISFLOOD разработана в Объединенном исследовательском центре Европейской комиссии (JRC). Наборы пространственных данных, используемые в LISFLOOD, включают топографические характеристики (цифровую модель рельефа, местное направление стока, уклон и другие), характер землепользования (клас-

сы землепользования, долю леса, долю городской территории), свойства почвы (классы текстуры и мощность) и параметры русла (длина, уклон, коэффициент шероховатости, ширина по дну, наклон бортов, глубина при наполненном русле). Большинство входных данных, параметров и переменных, необходимых для модели, оцениваются на основе опубликованных данных [12].

Подземный сток, рассчитанный в модели HTESSEL, используется в качестве входа в модуль подземных вод LISFLOOD, в котором имитируются две области (зоны) стока в виде двух параллельных линейных резервуаров, формирующих приток подземных вод в реки с задержкой по времени. Верхняя зона представляет собой «быстрый» подземный сток, в то время как нижняя зона – «медленный» сток из более глубоко залегающих подземных горизонтов и формирующих базовый устойчивый приток в реки. Параметр, отвечающий за время добегания вод из верхней зоны, постоянен и по умолчанию составляет 10 суток, однако возможно его изменение во время калибровки от 3 до 40 суток. Параметр, регулирующий время добегания вод из нижней зоны, по умолчанию равен 200 суткам, он также может изменяться во время калибровки от 40 до 500 суток.

Поверхностный сток, моделируемый в HTESSEL, поступает на вход модуля трансформации стока руслом модели LISFLOOD. Это двухэтапный процесс, при котором поверхностный сток из каждой ячейки расчетной сетки сначала направляется в нижележащую ячейку русла реки, затем суммарный приток воды трансформируется руслом с использованием уравнения кинематической волны. Параметры, регулирующие приток поверхностных и подземных вод, русловую трансформацию стока, подбираются в результате калибровки, исходя из условия наилучшего совпадения рассчитанного стока с наблюдаемым расходом воды в реках по всему миру. Подробности структуры модели LISFLOOD, используемой в GloFAS-ERA5, и ее калибровка детально описаны в работе [12].

Для оценок точности воспроизведения средних суточных расходов воды рек использовано около 2000 станций наблюдений за речным стоком по всему миру. Около 60% речных бассейнов имеют площадь от 10 000 до 50 000 км² [5; 6; 8]. При оценке качества моделирования речного стока чаще всего используется показатель Клинга – Гупты (Kling-Gupta Efficiency – KGE) [13; 14]. Он комплексно учитывают динамику стока, в том числе временные сдвиги через корреляцию, изменчивость стока через отношение стандартов и смещение на уровне средних между наблюдаемыми и моделированными расходами воды. Оптимальное значение KGE равно 1. Общие закономерности пространственного распределения показателей оценивались с использованием кумулятивной функции распределения (Cumulative distribution function – cdf), позволяющей рассчитать медианные значения, межквартильный размах (Interquartile range – IQR) и другие

характеристики показателей качества моделирования стока [12; 13].

В таблице 1 приведены значения KGE двух наиболее различающихся по качеству моделирования версий v2.1 и v4.0. Наиболее высокие оценки качества моделирования у реанализа речного стока GloFAS-ERA5 v4.0 [8]. Для всех бассейнов медианное значение KGE составляет 0,74 с межквартильным размахом (IQR) от 0,46 до 0,85. В ранней версии системы медианное значение KGE составляет 0,31 и IQR от 0 до 0,52. Это говорит о значительном улучшении качества гидрологического моделирования в версии 4.0 за счет более высокого пространственного разрешения (около 5 км), изменений в структуре модели и вычислительных процедурах, увеличения качества калибровки параметров.

Во всех версиях наилучшие результаты получены в Бразилии (особенно в бассейне Амазонки), Центральной Европе, в Восточных и Западных регионах США, Южной Африке и на реках побережья Австралии. Значительные области Северной Африки, стран Ближнего Востока, Австралии, Монголии, практически вся территория КНР не охвачены оценками системы GloFAS-ERA5 v4.0 [8]. Территория Российской Федерации, на которой использовано около 124 гидрометрических створов (ГС), характеризуется высокими показателями KGE (табл. 2).

Как видно из таблицы 2, для примерно 92% створов значения KGE превышают 0,6. Наибольшее количество створов, причем с KGE 0,6–0,8, приходится на реки Обь, Иртыш, Енисей, Ангара, Лена и Колыма. В бассейне реки Амур использовано только 5 створов. На Европейской территории Российской Федерации, на которую приходится 29 пунктов из 124, 52% водосборов имеют KGE более 0,8. Низкие значения, менее 0,6, характерны для зарегулированных рек.

Таблица 1

Значения кумулятивной функции распределения (cdf) показателей KGE всех станций

cdf	0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9
v2.1	-0,86	-0,16	0	0,09	0,22	0,31	0,40	0,48	0,52	0,57	0,69
v4.0	-0,08	0,38	0,46	0,55	0,65	0,74	0,78	0,83	0,85	0,88	0,92

Источник: составлено авторами на основе источников [5; 8].

Таблица 2

Значения показателей KGE для гидрометрических створов (ГС) Российской Федерации

KGE	0,8–1	0,6–0,8	0,4–0,6	0,2–0,4	0,4–0,6
ГС, %	71,8	20,2	4	3,2	0,8

Источник: составлено авторами на основе источников [5; 8].

Почти 99% исследованных водосборов земного шара показывают положительную корреляцию между наблюдаемыми и моделированными расходами воды с медианным значением $r = 0,61$. В Российской Федерации преобладают коэффициенты корреляции от 0,4 до 0,6 (47,9%). Наиболее высокие r (0,6–0,8 и более 0,8) составляют, соответственно, 29,0 и 11,1%, а низкие (0,2–0,4) – 12% водосборов.

В целом для 64% водосборов значения рассчитанных средних расходов воды меньше наблюдаемых, то есть отношение расходов, называемое коэффициентом смещения (bias ratio), $\beta < 1$. Медианное значение $\beta = 0,84$. При глобальной оценке стока рек смещение в пределах $\pm 20\%$ (эквивалентное коэффициенту смещения в пределах 0,8–1,2) считается очень хорошим. Однако только 28% станций реанализа v2.1 соответствуют этому критерию [5]. Преувеличенный по сравнению с наблюдениями сток характерен для некоторых рек Центральной части США, Африки, Восточной Бразилии, а также Западного побережья Южной Америки. В общей сложности 12% водосборов имеют $\beta > 2$ (т. е. ошибка расчета $> 100\%$). На территории Российской Федерации средний сток в пределах $\pm 20\%$ от наблюдаемого ($\beta = 0,8–1,2$) отмечен примерно для 40% водосборов, участвующих в оценках. Средний сток недооценивается примерно в 54%, а переоценивается – в 6% водосборов, причем преувеличение стока более 60% не встречается.

Для 61% исследованных водосборов земного шара характерна более низкая изменчивость стока реанализа, чем наблюдаемого стока (т. е. коэффициент вариации $\alpha < 1$). Глобальный медианный коэффициент $\alpha = 0,91$. Эта тенденция сохраняется и для территории Российской Федерации. Так, около 58% водосборов имеет $\alpha < 0,8$. Оптимальные его значения (0,8–1,2) отмечаются на 32% водосборов.

В целом медианное значение абсолютной ошибки (MAE) оценки стока составляет 0,41 мм/сут. Для территории Российской Федерации MAE суточного стока более 0,4 и 0,6 мм/сут. имеют, соответственно, 43 и 78% водосборов. Ошибок более 1,2 мм/сут. не отмечено [5; 8].

Анализ причин ошибок моделирования стока пока не выполнен, однако предварительные исследования показали, что ошибки в расчетах стока во многом определяются проблемами ассимиляции наземных данных, недостаточным учетом влияния

на сток озер и водохранилищ, а также проблемами точности реанализа ERA5 [4; 15].

Заключение

Система GloFAS позволяет оценивать средний суточный сток рек без гидрометрических наблюдений с приемлемой для практики точностью, создавая непрерывный ряд стока за период с 1979 года по настоящее время, причем этот ряд постоянно пополняется в автоматическом режиме и доступен для использования. Выпущено четыре основные версии системы. Наиболее высокие оценки качества моделирования демонстрирует реанализ речного стока GloFAS-ERA5 v4. Однако качество моделирования (точность расчета стока) значительно изменяется в зависимости от местоположения, что требует тестирования данных реанализа стока перед практическим использованием.

Список литературы

1. Doll P., Kaspar F., Lehner B. A Global Hydrological Model for Deriving Water Availability Indicators: Model Tuning and Validation // *Journal of Hydrology*. 2003. Vol. 270. Is. 1-2. P. 105–134. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169402002834> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00283-4.
2. Lin P., Pan M., Beck H.E., Yang Y., Yamazaki D., Frasson R., David C.H., Durand M., Pavelsky T.M., Allen G.H., Gleason C.J., Wood E.F. Global Reconstruction of Naturalized River Flows at 2.94 Million Reaches // *Water Resources Research*. 2019. Vol. 55. Is. 8. P. 6499–6516. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019WR025287> (дата обращения: 27.07.2025). DOI: 10.1029/2019WR025287.
3. Wongchuig S.C., de Paiva R.C.D., Siqueira V., Collischonn W. Hydrological Reanalysis Across the 20th Century: A Case Study of the Amazon Basin // *Journal of Hydrology*. 2019. Vol. 570. P. 755–773. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169419300915> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.01.025.
4. Beck H.E., van Dijk A. I.J.M., de Roo A., Dutra E., Fink G., Orth R., Schellekens J. Global Evaluation of Runoff from 10 State-of-the-Art Hydrological Models // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017. Vol. 21. Is. 6. P. 2881–2903. URL: <https://hess.copernicus.org/articles/21/2881/2017/> (дата обращения: 22.07.2025). DOI: 10.5194/hess-21-2881-2017.
5. Harrigan S., Zsoter E., Alfieri L., Prudhomme C., Salamon P., Wetterhall F., Barnard C., Cloke H., Pappenberger F. GloFAS-ERA5 Operational Global River Discharge Reanalysis 1979–present // *Earth System Science Data*. 2020. Vol. 12. P. 2043–2060. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/12/2043/2020/> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.5194/essd-12-2043-2020.
6. Alfieri L., Lorini V., Hirpa F.A., Harrigan S., Zsoter E., Prudhomme C., Salamon P. A Global Streamflow Reanalysis for 1980–2018 // *Journal of Hydrology* X. 2020. Vol. 6. № 100049. URL: <https://centaur.reading.ac.uk/106801/1/1-s2.0-S2589915519300331-main.pdf> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.1016/j.hydroa.2019.100049.
7. Tarek M., Brissette F.P., Arsenault R. Evaluation of the ERA5 Reanalysis as a Potential Reference Dataset for Hydrological Modeling Over North-America // *Hydrology and Earth System Sciences. Discussions*. 2019. P. 1–35. URL: <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2019-316/hess-2019-316.pdf> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.5194/hess-2019-316.

8. Salamon P., Prudhomme C., Baiamonte G., Barnard C., Baugh C., Rodriguez J.C., Casino A., De Wiart C.C., Choulga M., D'Angelo C., Decremier D., Disperati J., Dottori F., Grimaldi S., Hansford E., Harrigan S., Kalas M., Lorini V., Mazzetti C., Moschini F., Ramos A., Russo C., Stoilov D., Tasev D., Thiemig V., Zsoter E. What is New in GloFAS v4.0? // Presentation of report on the 2nd Global Flood Forecasting and Monitoring Meeting, organized by the Copernicus Emergency Management Service (CEMS), took place online on February 8-9, 2023. [Электронный ресурс]. URL: https://global-flood.emergency.copernicus.eu/media/events/4/what_is_new_in_glofas_v4.0.pdf (дата обращения: 25.07.2025).
9. van der Knijff J.M., Younis J., de Roo A.P.J. LIS-FLOOD: a GIS-based Distributed Model for River Basin Scale Water Balance and Flood Simulation // *International Journal of Geographical Information Science*. February 2010. Vol. 24. Is. 2. P. 189–212. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13658810802549154> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.1080/13658810802549154.
10. Albergel C., Dutra E., Munier S., Calvet J.-C., Munoz-Sabater J., de Rosnay P., Balsamo G. ERA-5 and ERA-Interim Driven ISBA Land Surface Model Simulations: Which One Performs Better? // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 22. Is. 6. P. 3515–3532. URL: <https://hess.copernicus.org/articles/22/3515/2018/> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.5194/hess-22-3515-2018.
11. Balsamo G., Beljaars A., Scipal K., Viterbo P., van den Hurk B., Hirschi M., Betts A.K. A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System // *Journal of Hydrometeorology*. June 2009. Vol. 10. Is. 3. P. 623–643. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1175/2008JHM1068.1?ysclid=meqb3ylumu707091706> (дата обращения: 27.07.2025). DOI: 10.1175/2008JHM1068.1.
12. Hirpa F.A., Salamon P., Beck H.E., Lorini V., Alfieri L., Zsoter E., Dadson S.J. Calibration of the Global Flood Awareness System (GloFAS) Using Daily Streamflow Data // *Journal of Hydrology*. November 2018. Vol. 566. P. 595–606. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.jhydrol.2018.09.052?ysclid=meqbhk20dw266389970> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.052.
13. Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling // *Journal of Hydrology*. 2009. Vol. 377. Is. 1–2. P. 80–91. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003?ysclid=meqc7n6bj865663003> (дата обращения: 21.07.2025). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
14. Krause P., Boyle D.P., Bäse F. Comparison of Different Efficiency Criteria for Hydrological Model Assessment // *Advances in Geosciences*. 2005. Vol. 5. P. 89–97. URL: <https://adgeo.copernicus.org/articles/5/89/2005/adgeo-5-89-2005> (дата обращения: 25.07.2025). DOI: 10.5194/adgeo-5-89-2005.
15. Zajac Z., Revilla-Romero B., Salamon P., Burek P., Hirpa F.A., Beck H. The Impact of Lake and Reservoir Parameterization on Global Streamflow Simulation // *Journal of Hydrology*. 2017. Vol. 548. P. 552–568. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/14478/1/1-s2.0-S0022169417301671-main.pdf> (дата обращения: 24.07.2025). DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.022.