

УДК 556.5.06:556.53
DOI 10.17513/use.38456

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТОКА РЕКИ БУРЕЯ

¹Федоровский А.С., ²Бортин Н.Н., ²Кролевецкая Ю.В., ³Костык В.А.

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Дальневосточное отделение Российской академии наук», Владивосток,
Российская Федерация, e-mail: as.fedorovskiy@mail.ru;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Российский научно-исследовательский институт комплексного использования
и охраны водных ресурсов», Дальневосточный филиал, Владивосток, Российская Федерация;

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Тихоокеанский институт географии Дальневосточного отделения
Российской академии наук», Владивосток, Российская Федерация

Оценка стока рек при недостаточности или отсутствии данных гидрометрических наблюдений представляет одну из сложных проблем в решении водохозяйственных задач в бассейнах рек Дальнего Востока. Цель исследования – оценить характеристики стока одного из крупнейших притоков реки Амур – реки Бурея у с. Малиновка (площадь водосбора 67 400 км²) за период с 1979 по 1987 год с помощью глобального реанализа стока GloFAS-ERA5 v4. В основе реанализа лежит гидрологическая модель с открытым исходным кодом LISFLOOD, которая полуавтоматически калибруется с использованием наблюденных расходов воды в реках по всему миру, а также реанализ атмосферы ERA5 в качестве входных метеоданных. Выполненные авторами статьи исследования показали, что в целом реанализ достаточно точно воспроизводит гидрограф речного стока р. Бурея, коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными средними суточными расходами воды за рассматриваемый период составляет 0,897. Наблюдаются некоторое преуменьшение отдельных характеристик речного стока, отмеченное ранее другими авторами. Так, средние суточные расходы воды в среднем на 4,07% меньше наблюденных. Сток по годовым и месячным интервалам также несколько ниже наблюденного стока, среднее отклонение составляет 3,85 и 4,01% соответственно. Недооценены на 25,5% наибольшие в году суточные расходы воды. В целом критерии качества моделирования Нэша-Сатклифа (NSE) и Клинга-Гупты (KGE) для суточного стока достаточно высокие и составляют 0,802 и 0,879 соответственно.

Ключевые слова: речной сток, гидрологическое моделирование, водосбор, реанализ стока, река Бурея

USING HYDROLOGICAL REANALYSIS TO ASSESS THE RUNOFF OF THE BUREYA RIVER

¹Fedorovskiy A.S., ²Bortin N.N., ²Krolevetskaya Y.V., ³Kostyk V.A.

¹Federal State Budgetary Institution of Science “Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences”, Vladivostok, Russian Federation,
e-mail: as.fedorovskiy@mail.ru;

²Federal State Budgetary Institution of Science “Russian Scientific Research
Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources”,
Far Eastern Branch, Vladivostok, Russian Federation;

³Federal State Budgetary Institution of Science “Pacific Institute of Geography
of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences”,
Vladivostok, Russian Federation

River runoff assessment, when hydrometric data are insufficient or absent, is one of the complex problems in solving water management issues in the river basins of the Far East. The objective of this study was to assess the runoff characteristics of one of the largest tributaries of the Amur River, the Bureya River near the village of Malinovka (catchment area 67,400 km²), for the period from 1979 to 1987 using the GloFAS-ERA5 v4 global runoff reanalysis. The reanalysis is based on the open-source hydrological model LISFLOOD, which is semi-automatically calibrated using observed river discharges worldwide, as well as the ERA5 atmospheric reanalysis as input meteorological data. The authors' research showed that, overall, the reanalysis accurately reproduces the Bureya River runoff hydrograph; the correlation coefficient between measured and calculated average daily water discharges for the period under review is 0,897. Some underestimation of certain river runoff characteristics, previously noted by other authors, is observed. For example, average daily water discharges are, on average, 4,07% lower than observed discharges. Runoff for annual and monthly intervals is also slightly lower than observed runoff, with average deviations of 3,85% and 4,01%, respectively. The highest annual daily water discharges are underestimated by 25,5%. In general, the Nash-Sutcliffe (NSE) and Kling-Gupta (KGE) modelling quality criteria for daily runoff are quite high and amount to 0,802 and 0,879, respectively.

Keywords: river runoff, hydrological modeling, catchment, runoff reanalysis, Bureya River

Введение

Недостаточность или отсутствие надежных и длительных наблюдений за стоком воды рек в бассейне реки Амур и его притоков является одной из сложных проблем в регулировании стока и защите территории от наводнений. Наряду с существующими подходами в определении характеристик речного стока в таких условиях начинают привлекаться данные реанализов стока [1–3]. Реанализ объединяет прошлые наблюдения с гидрологическими моделями для создания последовательных временных рядов речного стока, важным условием эффективной работы которых является наличие опорной сети гидрометрических наблюдений для подбора параметров, а также методик регионализации этих параметров в условиях отсутствия данных наблюдений, например [4; 5]. Потенциал регионального реанализа речного стока R5 с разрешением по времени один месяц и пространственным разрешением $0,5^\circ$ применительно к задаче определения расчетных гидрологических характеристик оценен на примере пяти водосборов в бассейне Верхней Волги с площадями водосборов от 1030 до 11 600 км² [6]. Авторами исследования показано, что отклонения моделированного среднегодового многолетнего расхода воды и его расчетных (обеспеченных) величин от справочных данных являются незначительными. Оценка возможности использования глобального GloFAS-ERA5, а также регионального R5 реанализов стока для определения характеристик максимального суточного дождевого стока выполнена на примере пяти водосборов в бассейне р. Полометь с площадями водосборов от 48,3 до 2180 км² [7]. Установлено, что региональный реанализ стока показывает более хорошие результаты, чем глобальный. Однако только глобальный реанализ стока GloFAS-ERA5 охватывает территорию Дальнего Востока. Последний позволил, например, восстановить гидро-граф суточного стока в устье неизученной р. Налычева (Камчатка) площадью водосбора 1439 км² [8]. Таким образом, результаты исследований показывают, что реанализ речного стока является достаточно надежным источником данных. В то же время отмечается, что наличие выраженных региональных различий в результатах моделирования делает актуальными исследования применимости реанализов стока в различных регионах, особенно страдающих недостаточной гидрологической изученностью [9].

Цель исследования – оценка точности воспроизведения суточных, месячных, годовых и максимальных в году суточных расходов воды одного из крупных притоков Амура – горной р. Бурея у с. Малиновка с помощью данных реанализа речного стока GloFAS-ERA5 v4.

Материалы и методы исследования

Река Бурея – левый приток в среднем течении реки Амур. Бассейн расположен на территории Хабаровского края и Амурской области, он ограничен хребтами Малого Хингана, Буреинского, Дуссе-Алинь, Эзоп и Турана, образующих почти замкнутый контур овальной формы, вытянутый в северо-восточном направлении. Максимальные высоты рельефа на севере и северо-востоке бассейна достигают 2000–2500 и 900–1200 м на западе и востоке. В средней его части находится Верхне-Буреинская котловина с высотами 300–500 м. После выхода из гор и до устья река течет в пределах предгорий и Зейско-Буреинской равнины. Пониженные участки равнин заболочены [10].

Основные характеристики Глобального сеточного реанализа речного стока GloFAS-ERA5 v4 (далее – реанализ стока):

горизонтальное покрытие:

90° с. ш. – 60° ю. ш., 180° з. д. – 180° в. д.;

доступный период:

с 1979 г. по настоящее время;

пространственное разрешение сетки:

$0,05^\circ \times 0,05^\circ$;

разрешение по времени: одни сутки;

доступность по ссылке:

<https://ewds.climate.copernicus.eu>;

формат данных: GRIB2 и NetCDF-4.

В основе реанализа лежит гидрологическая модель с открытым исходным кодом LISFLOOD, которая полуавтоматически калибруется с использованием наблюдаемых расходов воды в реках по всему миру. В качестве входных метеоданных используется реанализ атмосферы ERA5, в котором генерируется так называемый климатический сток. Трансформация климатического стока выполняется гидрологической моделью, что позволяет рассчитать движение воды между соседними ячейками водосбора и оценить приток воды в русло реки. Гидрологическая модель генерирует непрерывный многолетний ряд ежедневных расходов воды – реанализ стока – в реках площадью от 500 км² с практически глобальным пространственным охватом [11].

Данные наблюдений за стоком воды р. Бурея в створе у с. Малиновка ($F=67\,400$ км²)

были получены из общедоступной базы данных речного стока GRDC (<https://portal.grdc.bafg.de>) за период с 1979 по 1987 год, в котором, с одной стороны, сток относительно не нарушен (в том числе из-за построенного водохранилища), а с другой – есть доступные данные реанализа стока.

Погрешности моделирования речного стока оцениваются статистическими методами, принятыми в гидрологических прогнозах, а также рядом специально разработанных для этих целей критериев [12; 13]. В отечественной и мировой практике наибольшую популярность имеет критерий Нэша-Сатклифа (Nash-Sutcliffe – NSE):

$$NSE = 1 - \left[\sum_{k=1}^N (y_k - o_k)^2 / \sum_{k=1}^N (o_k - \bar{o})^2 \right], \quad (1)$$

где y_k – рассчитанный расход воды, o_k – наблюденный расход воды, \bar{o} – средний по выборке расход воды.

Чем ближе NSE к единице, тем выше точность моделирования.

При $NSE > 0,75$ соответствие наблюденного и рассчитанного (моделированного) гидрографов стока рассматривается как хорошее.

При $0,35 < NSE \leq 0,75$ – как удовлетворительное [14].

Другой популярный критерий – Клинга-Гупты (Kling-Gupta – KGE):

$$KGE = 1 - \sqrt{\left(r - 1 \right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_0} - 1 \right)^2}, \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона, σ_s и μ_s – среднеквадратические отклонения (стандарты) и средние значения наблюденных и моделюемых данных.

Критерий KGE комплексно учитывает динамику стока, в том числе временные сдвиги через корреляцию, изменчивость стока через отношения стандартов и смещение на уровне средних между наблюденными и моделюемыми расходами воды. Чем ближе KGE к единице, тем выше точность моделирования [14].

Кроме критериев NSE и KGE, для характеристики точности результатов моделирования стока рассматривается параметр BIAS (смещение/отклонение), который определяет среднее отклонение рассчитанных (моделируемых) y_k от наблюденных o_k значений (в нашем случае расходов воды):

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_k - o_k). \quad (3)$$

В случае использования абсолютной величины разности в уравнении (3) – это параметр MAE (Mean Absolute Error). Относительное отклонение в % от среднего наблюдаемых расходов оценивается параметром PBIAS (Percent BIAS):

$$PBIAS = \frac{BIAS}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N o_k} \times 100\%. \quad (4)$$

Применяется также коэффициент парной корреляции Пирсона между наблюдаемыми и моделюемыми характеристиками стока r , его квадрат, называемый коэффициентом детерминации (R^2). Наибольшая теснота связей наблюдается при стремлении их значений к 1.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показано сопоставление наблюденных и рассчитанных (реанализ стока) средних суточных расходов воды р. Бурея. Как видно из рисунка, рассчитанный сток в целом соответствует наблюденному стоку, что подтверждается также статистическими характеристиками. Так, среднее наблюденных и рассчитанных значений за весь рассматриваемый период составляет 819 и 853 м³/с соответственно. При стандартных ошибках средних 18,0 и 19,0. Отклонение стока реанализа в сторону преумышления составляет 4,07%. Рассеивание данных относительно среднего значения у рассчитанных данных несколько ниже, чем наблюденных: стандартное отклонение составляет 1033 и 1088 м³/с соответственно. Медианные значения наблюденного и рассчитанного стока равны 322 и 369 м³/с соответственно, различие – 12,8%. Как видно из рис. 1, данные реанализа формируют слишком кручу ветвь спада осенних расходов воды, поэтому его наименьший расход ниже, чем наблюденного стока: 0,0 и 4,6 м³/с соответственно, что в целом не существенно при наблюдаемом среднем многолетнем стоке 888 м³/с. Недооценены на 20,3% наибольшие за этот период расходы воды: 6780 и 8510 м³/с соответственно, что также приемлемо для этой фазы водного режима. Коэффициент корреляции между измеренными и рассчитанными средними суточными расходами воды r составляет 0,897 при стандартной ошибке $\sigma_r = 0,003$, что указывает на хорошую синхронность их колебаний. Безразмерные критерии качества моделирования NSE и KGE для сред-

них суточных расходов воды – достаточно высокие и составляют 0,802 и 0,879 соответственно. В целом можно считать, что реанализ с приемлемой для практики точностью воспроизводит гидрограф суточного стока.

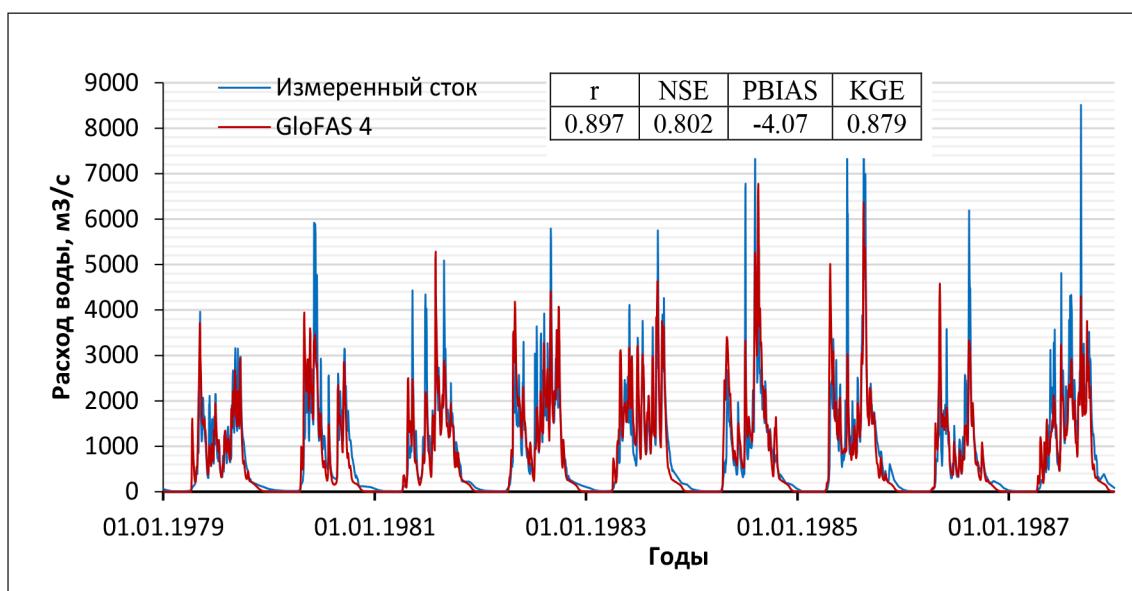
Годовой сток в целом оценивается достаточно успешно (таблица). Как видно из таблицы, в 1979–1981 и 1985–1987 гг. рассчитанные средние годовые расходы воды меньше наблюденных расходов воды ($BIAS < 0$), а в 1982–1984 гг. – их превышают ($BIAS > 0$). Наименьшее отклонение рассчитанного стока составляет $-3,0 \text{ м}^3/\text{с}$ (0,457% от наблюденного годового стока) в 1979 году, наибольшее – $-186 \text{ м}^3/\text{с}$ (18,0%) в 1987 году.

Сток незначительно завышен в 1982 году (2,08%), достигая 14,8% – в 1984 году (таблица). В среднем за 1979–1987 гг. отклонение рассчитанного стока (PBIAS) составляет $-4,07\%$. При этом средняя абсолютная ошибка равна $71,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (8,46% от наблюденного годового стока). Значительная ошибка расчета стока в 1987 году, по-видимому, связана с многоводностью года, обусловленной

прохождением высоких паводков в течение всего теплого периода. По данным наблюдений, в этом году средний годовой расход воды составляет $1034 \text{ м}^3/\text{с}$ при среднегодовом многолетнем расходе воды $888 \text{ м}^3/\text{с}$.

Внутригодовое распределение стока – важнейшая характеристика водохозяйственных расчетов. На рис. 2. приведено сопоставление средних за рассматриваемый период средних месячных расходов воды.

Среднее относительное отклонение рассчитанных месячных расходов воды от наблюденных (PBIAS) составляет $-4,01\%$, т.е. сток несколько недооценивается. Абсолютная погрешность (MAE) составляет $131 \text{ м}^3/\text{с}$ (15,4% от среднемесячного стока). Наибольшее занижение рассчитанного стока по отношению к наблюденному стоку характерно для месяцев с низкой водностью (I–III и XII). В то же время рассчитанный сток в период половодья примерно на 117% выше наблюденного стока в апреле и на 10,9% – в мае (400 и $179 \text{ м}^3/\text{с}$ в абсолютном выражении).



*Рис. 1. Измеренные и рассчитанные средние суточные расходы воды
р. Бурея у с. Малиновка за период с 1.01.1979 по 31.12.1987*
Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

Сопоставление наблюденных и рассчитанных средних годовых расходов воды

| Годы | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 | 1986 | 1987 | Среднее |
|-----------------------------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|---------|
| Наблюдения | 657 | 805 | 795 | 913 | 965 | 843 | 1007 | 619 | 1034 | 849 |
| GloFAS v4 | 654 | 707 | 711 | 932 | 990 | 968 | 939 | 581 | 848 | 814 |
| BIAS, $\text{м}^3/\text{с}$ | -3,0 | -98,0 | -84,0 | 19,0 | 25,0 | 125 | -68,0 | -38,0 | -186 | -34,2 |

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования.

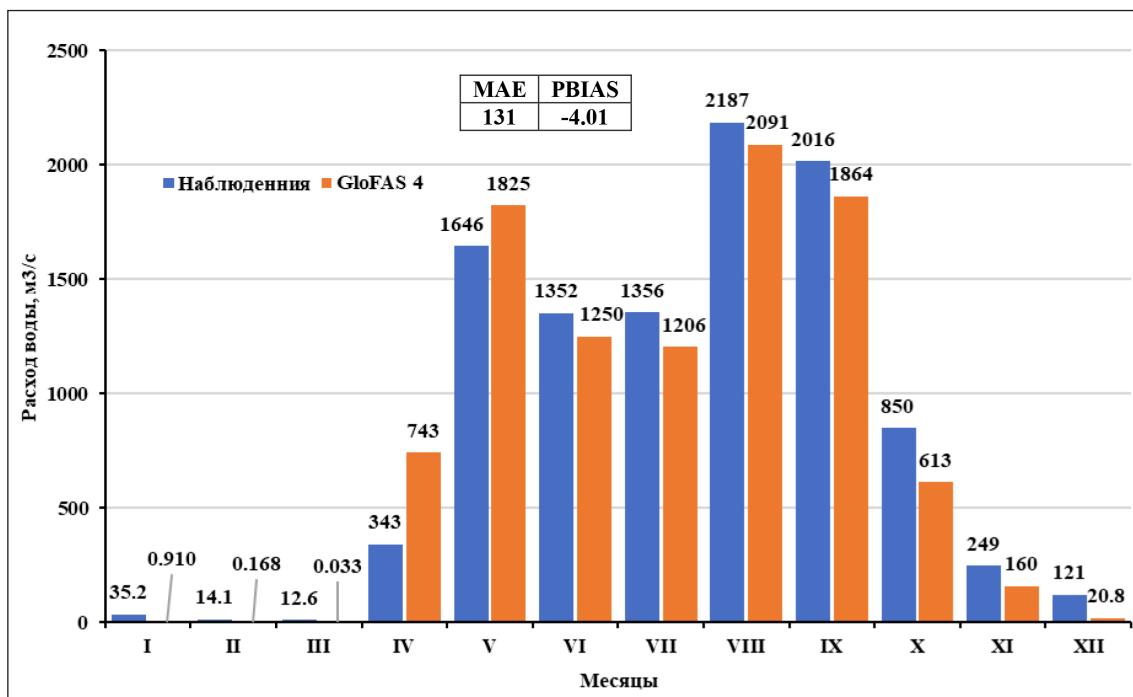


Рис. 2. Распределение наблюденных и рассчитанных средних расходов воды

за месяц р. Бурея у с. Малиновка за период с 1979 по 1987 г.

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

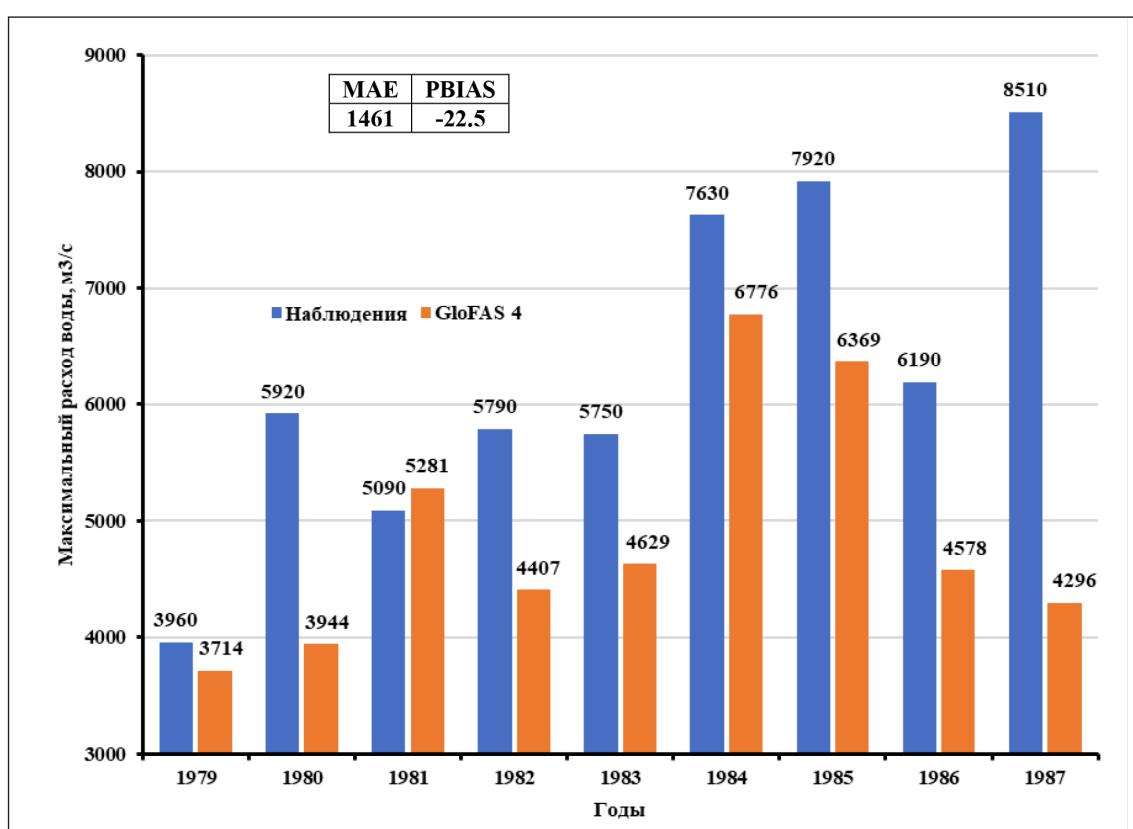


Рис. 3. Наблюденные и рассчитанные максимальные в году

средние суточные расходы воды р. Бурея у с. Малиновка, м³/с

Примечание: составлено авторами по результатам данного исследования

В летний период (VI – VIII) и в начале осени (IX), в период формирования дождевых паводков, рассчитанные расходы воды незначительно ниже наблюденных от -4,4 до -11,1% соответственно. МАЕ здесь составляет около 100–150 м³/с. По мере снижения стока в осенний период (X – XI) относительное отклонение растет до -28 – -36% (рис. 2). Таким образом, внутригодовое распределение стока система GloFAS 4 в целом моделирует достаточно успешно, в том числе и во время летне-осенних паводков. Однако сток весеннего половодья моделируется менее качественно, так же как и сток воды в период зимней межени, что, вероятно, связано с системными проблемами моделирования стока в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов.

Максимальный сток играет определяющую роль в вопросах защиты территории от наводнений, прогнозирования русловых деформаций и в других приложениях. Распределение максимальных в году суточных расходов воды показано на рис. 3. В целом максимальные средние суточные расходы воды реанализ стока не дооценивает, за исключением 1981 года. Наименьшие отклонения рассчитанных суточных максимумов от наблюденных отмечены в 1979 и 1981 годах: -6,21 и 3,75% соответственно, которые тяготеют больше к маловодным годам (соответственно 657 и 795 м³/с при среднегодовом многолетнем расходе воды 888 м³/с). Однако в еще более маловодном 1986 году (619 м³/с) рассчитанный максимальный расход меньше наблюденного на 26%. Наибольшее отклонение – в относительно многоводном 1987 году, оно составляет -49,5%.

Среднее относительное отклонение PBIAS за рассматриваемый период составляет -22,5%, или 1461 м³/с в абсолютном выражении. Это в целом соответствует выводам, сделанным в работе [2], о занижении реанализом стока GloFAS–ERA5 в среднем на 20% максимального суточного дождевого стока для равнинных водосборов площадью более 2000 км², что может говорить о системности ошибки и необходимости корректировки данных [15].

Заключение

Результаты исследования показывают, что данные реанализа позволяют достаточно хорошо воспроизводить гидрограф стока воды. В среднем за рассмотренный период наблюдается незначительное преуменьшение (на 4,07%) рассчитанных сред-

них суточных расходов воды по сравнению с наблюдеными. При этом безразмерные критерии качества моделирования суточного стока NSE и KGE – достаточно высокие и составляют 0,802 и 0,879 соответственно. Достаточно успешно оценивается годовой сток и его внутригодовое распределение. Среднее относительное смещение (преуменьшение) для годовых и средних месячных расходов воды составляет около 4%. Таким образом, исследование показывает, что реанализ может быть использован для оценки стока рек, сходных по условиям с р. Бурея. Это открывает новые возможности по учету стока неизученных рек в бассейне реки Амур, в том числе в трансграничных районах. Однако, как отмечают исследователи, качество моделирования меняется в зависимости от местоположения, поэтому может потребоваться коррекция данных реанализа для соответствующих природных условий перед практическим использованием.

Список литературы

1. 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. DOI: 10.5194/hess-21-2881-2017.
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 Resource Research. 2019. Vol. 55. Is. 8. P. 6499–6516. DOI: 10.1029/2019WR025287.
3. Senent-Aparicio J., Blanco-Gómez P., López-Ballesteros A., Jimeno-Sáez P. Evaluating the potential of GloFAS-ERA5 river discharge reanalysis data for calibrating the SWAT model in the Grande San Miguel river basin (El Salvador) // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. 3299. DOI: 10.3390/rs13163299.
4. 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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.052.
5. Романов А.В. Взгляд на региональную Европейскую систему предупреждения о наводнениях с учетом партнерских отношений с нашей Российской Федерацией // Ученые записки РГГМУ 2019. № 57. С. 176–186. URL: <https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue57/UZ-57-el.pdf> (дата обращения: 07.09.2025).
6. Айзель Г.В., Белозёров Е.В., Курочкина Л.С. Определение расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений: потенциал использования регионального сеточного реанализа речного стока // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 83–101. DOI: 10.35567/1999-4508-2020-2-6.
7. Грек Е.Н. Пространственно-временная изменчивость дождевых паводков на малых и средних реках Северо-Запада России. Автореферат на соискание ученой степени кандидата географических наук. Санкт-Петербург: ГГИ, 2023. 26 с. URL: <https://www.dissertcat.com/content/prostranstvenno-vremenennaya-izmenchivost-dozhdevykh-pavodkov-na-malykh-i-srednikh-rekakh-seve> (дата обращения: 07.09.2025).

8. Чалов С.Р., Цыпленков А.С., Школьный Д.И., Прокопьева К.Н., Бахарева Е.И. К оценке возможного влияния материкового стока на гибель гидробионтов в Авачинском заливе Тихого океана (Камчатка) // Известия Русского географического общества. 2022. Том 154. № 4. С. 69–84. DOI: 10.31857/S0869607122040048.
9. 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. DOI: 10.1016/j.jhydroa.2019.100049.
10. Мордовин А.М., Шестеркин В.П., Антонов А.Л. Река Бурея. Гидрология. Гидрохимия. Ихтиофауна. Хабаровск: ИВЭП, 2006. 149 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003083686> (дата обращения: 07.09.2025).
11. Федоровский А.С., Кролевецкая Ю.В. Глобальная система предупреждения наводнений: гидрологический ре-анализ // Успехи современного естествознания. 2025. № 9. С. 100-105. DOI: 10.17513/use.38434.
12. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров Ю.А. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1. С. 71–117. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-1-71-117.
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. 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. DOI: 10.5194/adgeo-5-89-2005.
15. Liu L., Zhou L., Gusyev M., Ren Y. Unravelling and improving the potential of global discharge reanalysis dataset in streamflow estimation in ungauged basins // Journal of Cleaner Production. 2023. Vol. 419. Is. 20. 138282. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138282.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.