

ОЦЕНКА АНОМАЛИЙ ГРУНТОВЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТИЗИРОВАННОГО ИНДЕКСА БАЗИСНОГО СТОКА

Климатические изменения в совокупности с различными видами антропогенного воздействия изменили режим стока многих рек. Целью работы является оценка возможности применения стандартизированного индекса базисного стока для мониторинга и управления водными ресурсами в условиях изменения климата. Объект исследования – речная сеть бассейна реки Белая. Для выделения базисного стока был применен метод Экхарда, что позволило провести анализ взаимосвязи между базисным и общим речным стоком. Результаты расчетов показали высокую корреляцию между стандартизированными индексами стока, индекса базисного стока и метеорологического индекса осадков; выявлены значительные различия в вероятностных распределениях для различных гидрологических постов. Индекс SBFI продемонстрировал свою эффективность в мониторинге засухи и может служить альтернативой для оценки состояния подземных вод в условиях нехватки данных.

Ключевые слова: метод выделения базисного стока; стандартизированный индекс общего речного стока; стандартизированный индекс базисного стока; функция распределения; река Белая.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2024.4.23.29>

Введение

Климатические изменения в совокупности с различными видами антропогенного воздействия оказывают значительное влияние на сток рек. Точное расчленение гидрографа на генетические составляющие стока позволит определить расход воды, который будет минимально необходимым для формирования речного стока. При расчленении гидрографа выделяют генетическую составляющую речного стока, известную как «базисный сток». Базисный сток формируется за счет грунтовых вод и является постоянной составляющей общего речного стока (Hall, 1968; Виссмен, 1979; Tallaksen, 1995).

Расчленение гидрографа на генетические составляющие также позволяет выполнить расчет метеорологических и гидрологических индексов засухи (Liu et al., 2019; Bazrkar, Chu, 2020). Гидрологические индексы засухи – стандартизированный индекс стока (standardized runoff index – SRI), индекс засушливости стока (streamflow drought index – SDI), стандартизированный индекс уровня грунтовых вод (standardized groundwater level index – SGI), стандартизированный индекс стока (standardized streamflow index – SSFI) и стандартизированный индекс базисного стока (standardized base flow index – SBFI) – связаны с изменением поверхностных или подземных вод (Zargar et al., 2011; Tallaksen et al., 2004; Shukla, Wood, 2008; Nalbantis, Tsakiris, 2009; Modarres, 2007).

Индекс SSFI был разработан на основе метеорологического индекса осадков (standardized precipitation index – SPI) (Bloomfield et al., 2013). Исследования по оценке корреляции между SPI и SGI продемонстрировали недостатки использования SPI в качестве индикатора грунтовых вод (McKee et al., 1993). Это подчеркивает необходимость поиска более эффективной альтернативы при оценке состояния грунтовых вод. Поэтому значения базисного стока, полученные в ходе расчленения гидрографа на генетические составляющие, могут быть использованы для оценки истощения подземных вод (Hall, 1968).

Целью настоящего исследования является оценка возможности применения стандартизированного индекса базисного стока (SBFI) для мониторинга и управления водными ресурсами в условиях изменения климата.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белая, расположенного на территории Южного Урала, Россия. Климат региона умеренно континентальный, характеризующийся влажным теплым летом и суровой зимой. Среднегодовое количество осадков варьируется от 350 до 800 мм. Снежный покров формируется во второй половине ноября и тает к середине апреля. Река Белая течет преимущественно в северо-западном направлении, постепенно расширяясь и переходя

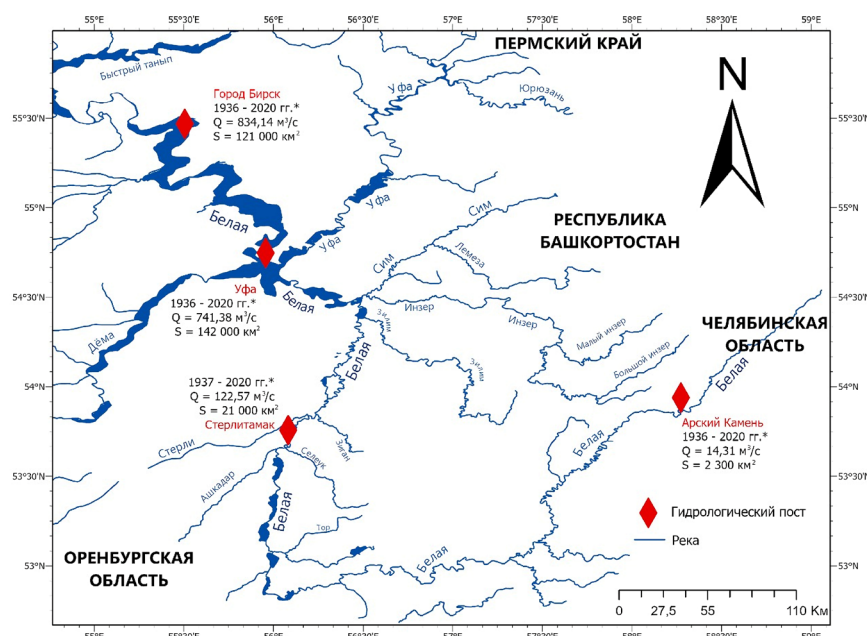


Рис. 1. Бассейн реки Белая и расположение гидрологических постов
 * период наблюдений, годы; Q – средний расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; S – площадь водосбора, км^2
 Fig. 1. Belaya River basin and hydrological station locations
 * observation period, years; Q – average water flow, $\text{м}^3/\text{с}$; S – catchment area, км^2

для от горного к равнинно-му типу течения. Основное питание реки происходит за счет снегового таяния. Площадь бассейна составляет $142\,000\text{ км}^2$ (рис. 1).

Для проведения исследований использовались многолетние данные наблюдений за среднесуточным расходом воды на 4 гидрологических постах (рис. 1). Для выделения базисного стока использован метод Экхардта (Eckhardt) (Eckhardt, 2005). Определены параметры коэффициента спада α и BFI_{max} , принимающие значения от 0.25 до 0.8 в зависимости от типа горной породы. Значения коэффициента спада α для гидрологических постов (Арский камень, Стерлитамак, Уфа, Бирск), составляют 0.84, 0.87, 0.95 и 0.95, соответственно (Хасанов

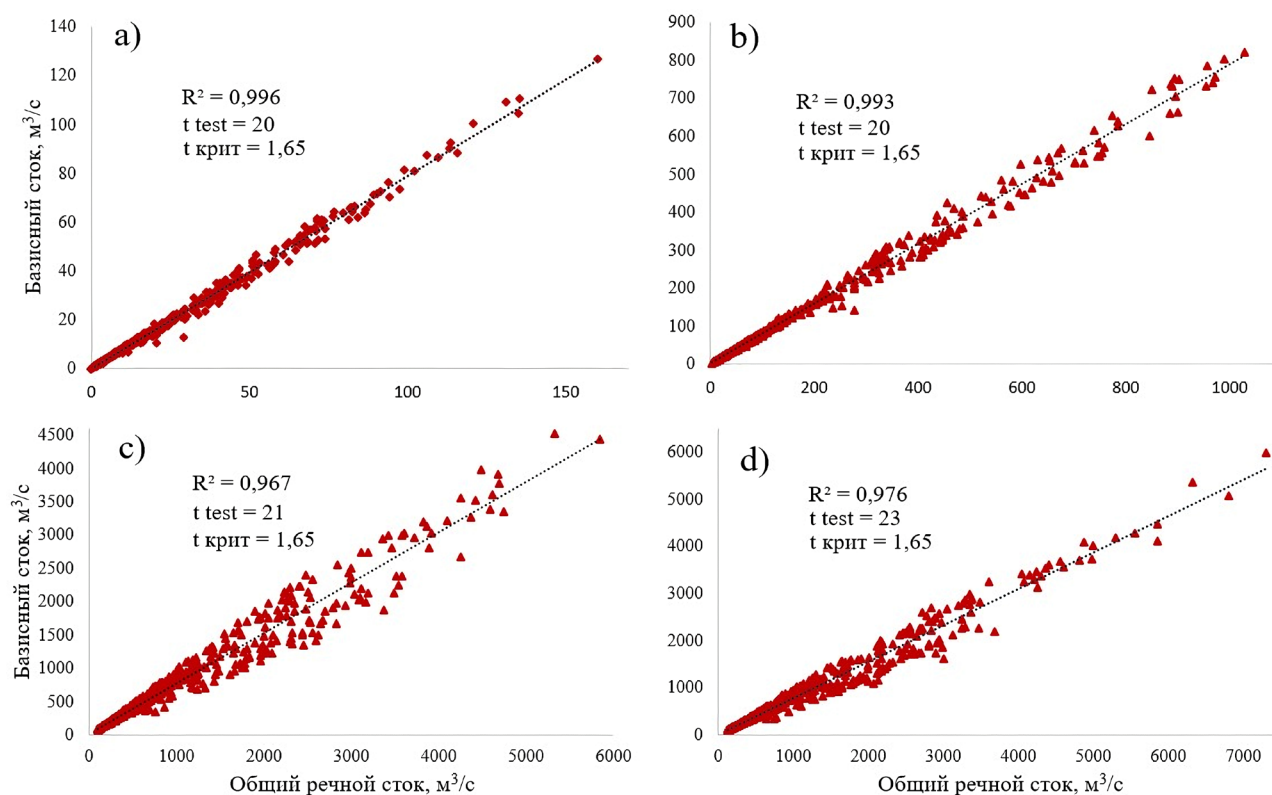


Рис. 2. Сравнение общего речного стока с базисным стоком для гидрологических постов «Арский камень» (a), «Стерлитамак» (b), «Уфа» (c) и «Бирск» (d)
 Fig. 2. Comparison of total river flow with base flow for the hydrological stations «Arsky Kamen» (a), «Sterlitamak» (b), «Ufa» (c), and «Birs'k» (d)

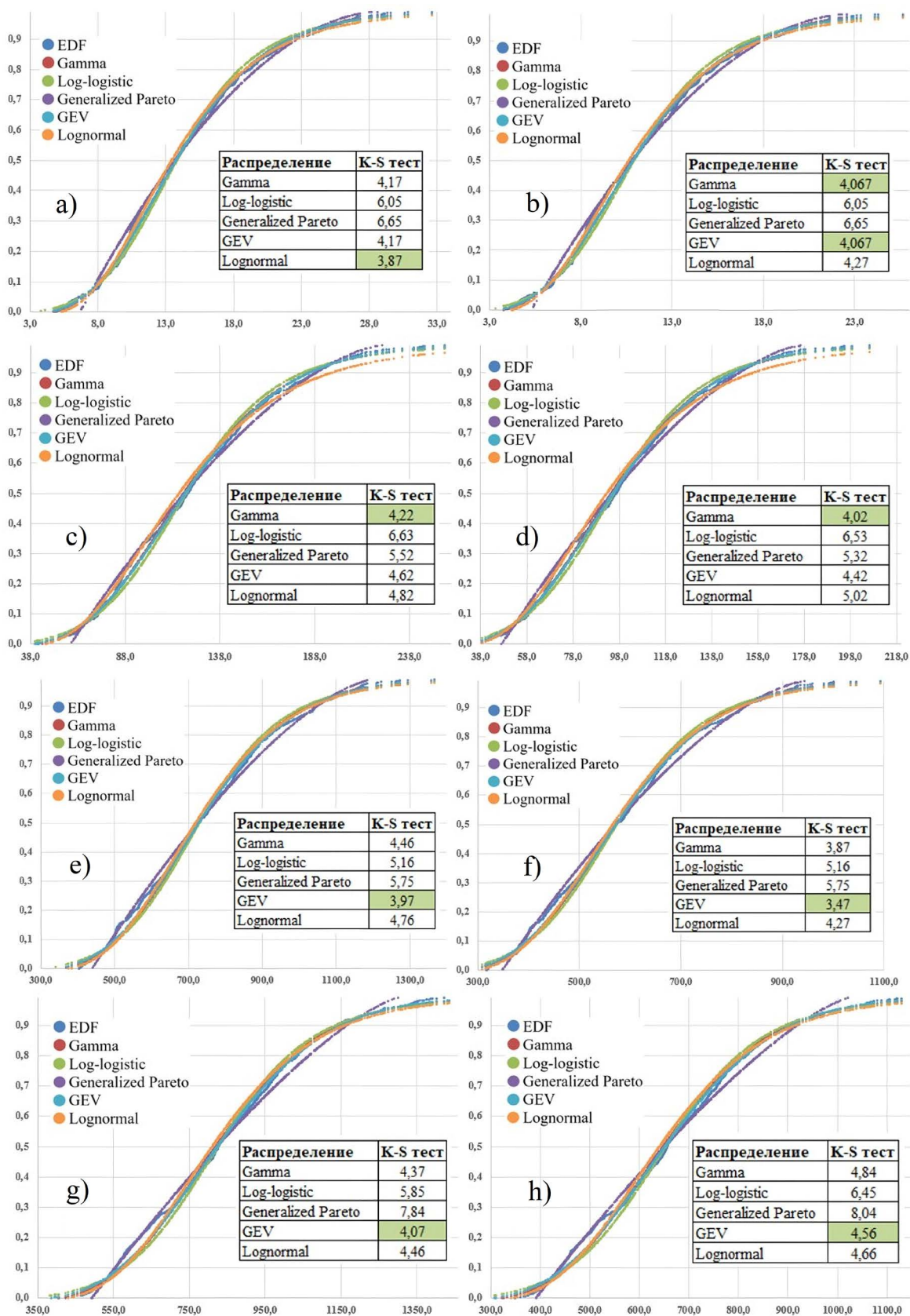


Рис. 3. Кумулятивные функции распределения для гидрологических постов «Арский камень» (a – общий речной сток, b – базисный сток), «Стерлитамак» (c – общий речной сток, d – базисный сток), «Уфа» (e – общий речной сток, f – базисный сток) и «Бирск» (g – общий речной сток, h – базисный сток)

Fig. 3. Cumulative distribution functions for the hydrological stations «Arsky Kamen» (a – total river flow, b – baseflow), «Sterlitamak» (c – total river flow, d – baseflow), «Ufa» (e – total river flow, f – baseflow), and «Birsk» (g – total river flow, h – baseflow)

и др., 2024). В данном исследовании параметр BFI_{max} для всех рассматриваемых постов принят равным 0.8.

Для расчета индекса SBFI базисный сток заменяет осадки в методе SPI (Bloomfield et al., 2013). Процесс расчета SBFI включает несколько ключевых этапов: 1) собираются временные ряды общего речного стока и применяется метод выделения базисного стока. 2) проводится проверка различных вероятностных распределений к полученным временным рядам и выполняется тест на соответствие, чтобы определить наилучшее распределение. 3) оцениваются кумулятивные функции распределения (CDF) выбранного распределения. 4) завершается процесс стандартизацией значений CDF для окончательного расчета индекса SBFI (Hall, 1968).

В работе выполнен анализ для определения наиболее подходящего вероятностного распределения, учитывая пространственные и временные особенности гидроклиматических переменных. Для этого к временным рядам базисного стока каждого гидрологического поста применено четыре различных теоретических распределения (gamma, generalized pareto, log-logistic, GEV), а также эмпирическое распределение (Сучкова,

2021; Hosking, 1990; Hosking et al., 1985). Для выбора наилучшего подходящего распределения использовался тест Колмогорова-Смирнова (K-S). Кумулятивные функции распределения CDF стандартизованы наилучшего подходящего вероятностного распределения. Индекс SBFI получен путем оценки z-значения со средним, равным нулю, и дисперсией, равной единице, для базисного стока. Аналогичная процедура применена к общему речному стоку для расчета индекса SSFI.

Результаты и их обсуждение

Значения коэффициента детерминации R^2 лежат в диапазоне от 0.967 до 0.996, что свидетельствует о значительной зависимости базисного стока от общего речного стока. Тем не менее, значение парного t-критерия Стьюдента превышает критическое, указывая на статистически значимое расхождение между значениями базисного и общего речного стока (рис. 2). Анализ выявленных расхождений подчеркивает необходимость проведения дополнительных исследований.

Подобранное вероятностное распределение для дальнейшей оценки SSFI и SBFI может отличаться не только для каждого рассматриваемого гидрологического поста, но и для различных гене-

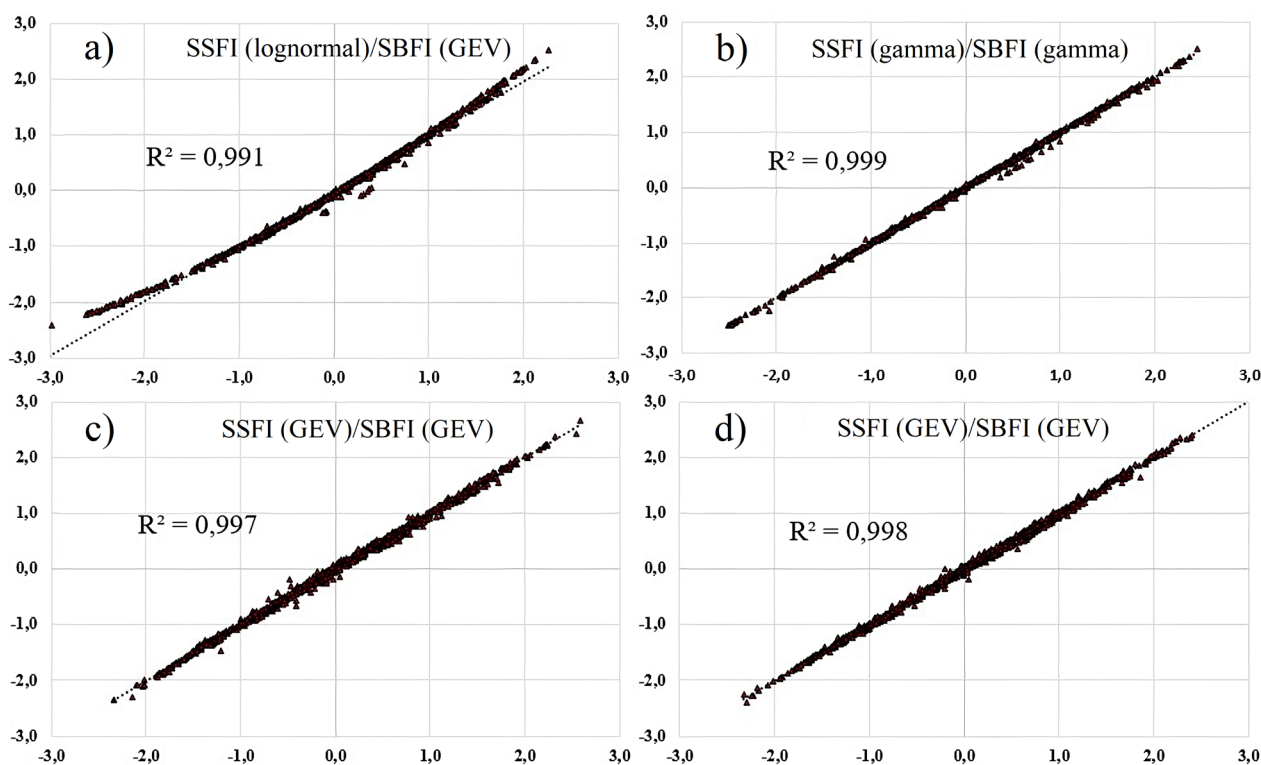


Рис. 4. Сравнение стандартизованного индекса общего речного стока (SSFI) со стандартизованным индексом базисного стока (SBFI) для гидрологических постов «Арский камень» (a), «Стерлитамак» (b), «Уфа» (c) и «Бирск» (d)

Fig. 4. Comparison of the standardized streamflow index (SSFI) with the standardized base flow index (SBFI) for the hydrological stations «Arsky Kamen» (a), «Sterlitamak» (b), «Ufa» (c), and «Birsk» (d)

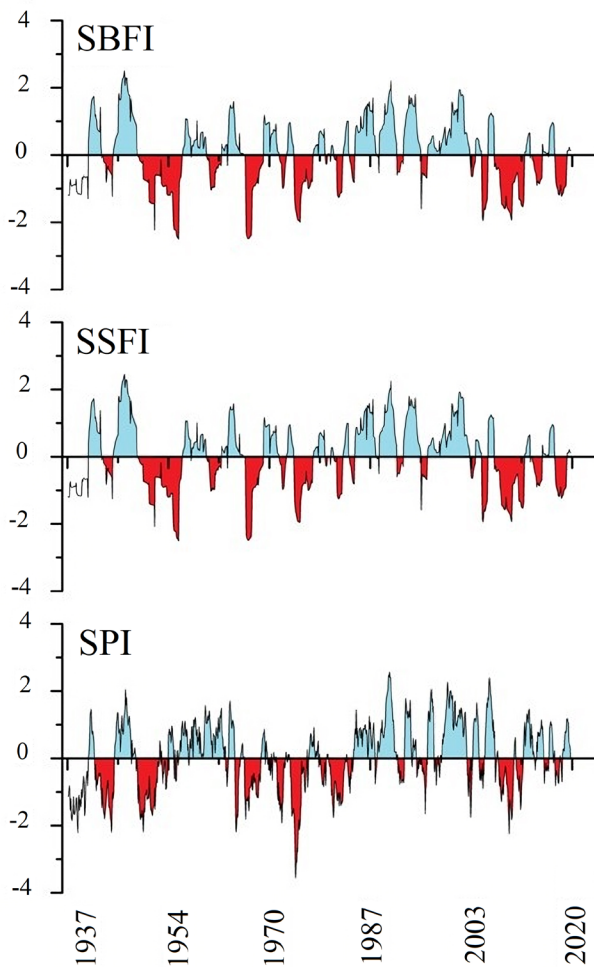


Рис. 5. Стандартизированные значения SBFi, SSFi и SPI с 1936 по 2020 гг. для гидрологического поста «Бирск». Периоды: засухи (красные) и увлажнения (голубые)

Fig. 5. Standardized values of SBFi, SSFi, and SPI from 1936 to 2020 for the hydrological station «Birsk». Periods: drought (red) and wet (blue)

тических составляющих стока (рис. 3). В частности, согласно результатам К-S теста, наибольшие противоречия возникают при подборе распределения для гидрологического поста «Арский камень», так как для общего речного стока подходит распределение Lognormal, а для базисного стока можно выбрать Gamma или GEV. На гидрологическом посту «Стерлитамак» подходит Gamma, тогда как для «Уфы» и «Бирска» лучшим решением будет GEV распределение.

Полученные значения стандартизованы с учетом наилучшего распределения и оценены с помощью коэффициента детерминации R^2 (рис. 4).

Анализ показал наличие незначительных выбросов для каждого гидрологического поста. Наименьшее значение R^2 было зафиксировано для гидрологического поста «Арский Камень». Тем не менее, высокие значения коэффициента детер-

минации для стандартизированных значений свидетельствуют о наличии связи между индексами SSFi и SBFi.

Используя данные инструментальных измерений с гидрологических постов и метеорологических станций вычислены значения всех трех индексов засухи SPI, SSFi и SBFi для гидрологического поста «Бирск», который является замыкающим створом в бассейне р. Белая (рис. 5). Для данного поста результаты проведенного корреляционного анализа установили высокую тесноту связи по всем индексам засухи ($r = 0.91$). Периоды засухи совпадают с годами, когда наблюдались экстремальные температуры воздуха, что в первую очередь связано с блокирующими антициклонами 1975 и 2010 годов. В эти же годы засухам предшествовали аномально холодные зимы с глубоким промерзанием почвы, в результате чего значительная часть зимне-весенних осадков преобразовалась в речной сток. Засухи, наблюдаемые в последние годы, в основном обусловлены перераспределением атмосферных осадков в течение года, при этом количество осадков в весенне-летний период сократилось по сравнению с осадками осенне-зимнего сезона.

Установлено, что индекс SBFi может быть очень эффективен для мониторинга и управления водными ресурсами в условиях изменения климата (Bazrkar, Chu, 2020). Индекс не подвержен резкому изменению количества осадков, что позволяет эффективнее выявлять засухи и своевременно принимать меры по их смягчению. Каждый индекс засухи объясняет лишь часть засухи, и использование одного индекса не может адекватно описать распространение засухи (Porhemmat, Al-tafi, 2023).

Заключение

Проведенный анализ продемонстрировал высокую корреляцию между гидрологическими индексами SSFi, SBFi и SPI и позволил оценить динамику увлажнения в бассейне реки Белая. Подбор вероятностных распределений для оценки SSFi и SBFi показал значительные различия в зависимости от генетических составляющих стока. Подобранные вероятностные распределения можно применить для методов машинного обучения и предсказания наступления маловодного периода.

Кроме того, поскольку сток грунтовых вод подпитывает реки в периоды межени, базисный сток можно считать хорошим индикатором состояния грунтовых вод. В условиях нехватки данных о грунтовых водах индекс SBFi может использоваться как эффективная альтернатива для

оценки истощения подземных вод.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Уфимского университета науки и технологий (Приоритет-2030).

Список литературы

1. Виссмен У. Введение в гидрологию. Л.: Гидрометеоздат, 1979. 470 с.
2. Сучкова К.В. Моделирование генетических составляющих речного стока на водосборе Можайского водохранилища: Дисс. ... канд. геогр. наук. М., 2021. 157 с.
3. Хасанов И.А., Елизарьев А.Н., Тараканов Д.А. Оценка эффективности методов выделения базисного стока для бассейна реки Белой, Россия // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34, вып. 1. С. 85–95.
4. Bazrkar M.H., Chu X. New standardized base flow index for identification of hydrologic drought in the Red River of the North Basin // Natural hazards review. 2020. Vol. 21, №4. 05020011.
5. Bloomfield J.P., Marchan. B.P. Analysis of groundwater drought building on the standardized precipitation index approach // Hydrology and earth system sciences. 2013. Vol. 17, iss. 12. P. 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>.
6. Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation // Hydrological processes. 2005. Vol. 19, iss. 2. P. 507–515.
7. Hall F.R. Base-flow recessions – a review // Water resources restoration. 1968. Vol. 4, iss. 5. P. 973–983.
8. Hosking J.R.M. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological) 1990. Vol. 52, iss. 1. P. 105–124.
9. Hosking J.R.M., Wallis J.R., Wood E.F. Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability weighted moments // Technometrics. 1985. Vol. 27, iss. 3. P. 251–261.
10. Liu Z., Liu S.Y., Ye J.P., Sheng F., You K.M., Xiong X.H., Lai G.L. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China // Forests. 2019. Vol. 10. 1065.
11. McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // 8th Conference on applied climatology. Boston: American Meteorological Society. 1993. P. 179–184.
12. Modarres R. Streamflow drought time series forecasting // Stochastic environmental research and risk assessment. 2007. Vol. 21, iss. 3. P. 223–233. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>.
13. Nalbantis I., Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited // Water Resources Management. 2009. Vol. 23, iss. 5. P. 881–897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>.
14. Porhemmat J., Dadgar M.A. Analysis of hydrological drought indices in Alpine Zagros Mountains of Iran // Arabian journal of geosciences. 2023. Vol. 16. 594.
15. Shukla S., Wood A.W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought // Geophysical research letters. 2008. Vol. 35, iss. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>.
16. Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis // Journal of hydrology. 1995. Vol. 165. P. 349–370.
17. Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004. 684 p.
18. Zargar A., Sadiq R., Naser B., Khan F.I. A review of drought indices // Environmental reviews. 2011. Vol. 19. P. 333–349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>.

References

1. Vissmen U. Vvedenie v gidrologiyu [Introduction to hydrology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 470 p.
2. Suchkova K.V. Modelirovanie geneticheskikh sostavlyayushchih rechnogo stoka na vodosbore Mozhaiskogo vodohranilishcha [Modeling of genetic components of river flow in the Mozhaisk reservoir watershed]: PhD (Cand. of Geography) thesis. Moscow, 2021. 157 p.
3. Khasanov I.A., Elizariyev A.N., Tarakanov D.A. Ocenka effektivnosti metodov vydeleniya bazisnogo stoka dlya bassejna reki Beloj, Rossiya [Assessing the effectiveness of baseflow allocation methods for the Belaya River basin, Russia] // Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Geosciences. 2024. Vol. 34, No 1. P. 85–95.
4. Bazrkar M.H., Chu X. New standardized base flow index for identification of hydrologic drought in the Red river of the North Basin // Natural hazards review. 2020. Vol. 21, No 4. 05020011.
5. Bloomfield J.P., Marchan. B.P. Analysis of groundwater drought building on the standardized precipitation index approach // Hydrology and earth system sciences. 2013. Vol. 17, iss. 12. P. 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>.
6. Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation // Hydrological processes. 2005. Vol. 19, iss. 2. P. 507–515.
7. Hall F.R. Base-flow recessions – a review // Water resources restoration. 1968. Vol. 4, iss. 5. P. 973–983.
8. Hosking J.R.M. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological) 1990. Vol. 52, iss. 1. P. 105–124.
9. Hosking J.R.M., Wallis J.R., Wood E.F. Estimation of the generalized extreme-value distribution by the method of probability weighted moments // Technometrics. 1985. Vol. 27, iss. 3. P. 251–261.
10. Liu Z., Liu S.Y., Ye J.P., Sheng F., You K.M., Xiong X.H., Lai G.L. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China // Forests. 2019. Vol. 10. 1065.
11. McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // 8th Conference on applied climatology. Boston: American Meteorological Society. 1993. P. 179–184.
12. Modarres R. Streamflow drought time series forecasting // Stochastic environmental research and risk assessment. 2007. Vol. 21, iss. 3. P. 223–233. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>.
13. Nalbantis I., Tsakiris G. Assessment of hydrological drought revisited // Water Resources Management. 2009. Vol. 23, iss. 5. P. 881–897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>.
14. Porhemmat J., Dadgar M.A. Analysis of hydrological drought indices in Alpine Zagros Mountains of Iran // Arabian journal of geosciences. 2023. Vol. 16. 594.
15. Shukla S., Wood A.W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought // Geophysical research letters. 2008. Vol. 35, iss. 2. P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>.
16. Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis // Journal of hydrology. 1995. Vol. 165. P. 349–370.
17. Tallaksen L.M., Van Lanen H.A.J. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004. 684 p.

18. Zargar A., Sadiq R., Naser B., Khan F.I. A review of drought indices // *Environmental reviews*. 2011. Vol. 19. P. 333–349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>.

Khasanov I.A. Assessment of groundwater anomalies using the standardized base flow index.

Climate change, combined with various types of anthropogenic impact, has changed the flow regime of many rivers. The purpose of the work was to assess the possibility of using the standardized index of base flow. The object of study was the river network of Belaya River basin. The Eckhardt method was used to isolate the base flow, which made it possible to ana-

lyze the relationship between the basic and total river flow. for monitoring and managing water resources under climate change conditions. The results showed the high correlation between the standardized flow indices, basic flow index and meteorological precipitation index, revealing significant differences in the probability distributions for different hydrological stations. The SBFI index has demonstrated its effectiveness in drought monitoring and can serve as an alternative for assessing groundwater status in data-poor settings.

Keywords: basic flow separation method; standardized streamflow index; standardized base flow index; distribution function; Belaya River.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 28.11.2024

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 05.12.2024

Принята к публикации / Accepted for publication: 12.12.2024

Сведения об авторах

Хасанов Ильмир Ахнафович, аспирант, ассистент, Уфимский университет науки и технологий, 450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32, E-mail: khasanovia@uust.ru

Information about author

Ilmir A. Khasanov, Postgraduate Student, Assistant, Ufa University of Science and Technology, 32, Zaki Validi st., Ufa, 450076, Russia, E-mail: khasanovia@uust.ru.

