

УДК 504.4.062.2(045)

*И.А. Хасанов, А.И. Елизарьев, Д.А. Тараканов***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ БАЗИСНОГО СТОКА
ДЛЯ БАССЕЙНА РЕКИ БЕЛОЙ, РОССИЯ**

Истощение водных ресурсов рек, связанное с антропогенным воздействием, диктует о необходимости выбора наиболее эффективного научно-обоснованного подхода расчленения гидрографа для понимания основных источников питания в меженьный период. Определение основных источников питания реки в период межени позволит проводить наиболее точное нормирование количественного использования водных ресурсов рек для предотвращения деградации речной экосистемы и ущерба хозяйственным комплексам. В данной работе представлены результаты использования 7 методов расчленения гидрографа. Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белой. Материалом исследования послужили многолетние данные наблюдений за среднесуточным расходом воды с 10 гидрологических постов. Исходя из результатов сравнительного анализа, метод Eckhardt является наиболее эффективным методом расчленения гидрографа и может быть рекомендован для использования для всей речной сети бассейна реки Белой.

Ключевые слова: метод выделения базисного стока, речной сток, поверхностный сток, коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклиффа, критерий Клинга-Гупты.

DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-1-85-95

Продолжающаяся антропогенная деятельность на водосборной площади в период межени приводит к истощению водных ресурсов [1–5]. Для формирования научных основ организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечения их экологической безопасности необходимо оценить вклад различных генетических составляющих стока в суммарный речной сток. Определение источников питания речного стока в период межени имеет важное значение для понимания генетической структуры речного стока, которая представляет собой сочетание различных типов водных масс [6], а также для научного обоснования государственного нормирования и стандартов в области геоэкологических аспектов природопользования. При полном отсутствии атмосферных осадков, в период межени, речной сток формируется в основном за счет поступления подземных вод. Оценка вклада подземных вод в суммарный речной сток позволит проводить регулирование количественного использования водных ресурсов.

В отечественной литературе отсутствует единый методический подход при выполнении нормирования водных ресурсов, как следствие, авторы используют разные термины: минимально необходимый, минимально приемлемый расход воды, санитарный попуск воды, рыбохозяйственные попуски и экологический сток [7–14]. В основе методов лежит определение величины минимально необходимого стока для оптимальных и нормальных условий, когда естественное воспроизводство минимально. Как правило, данная величина речного стока соответствует 80 % и 90–95 % обеспеченности. Также методы предполагают анализ кривых связи урожайности пойменных лугов, воспроизводства планктона с гидрологическими характеристиками [7; 11; 12].

В зарубежной литературе при расчленении гидрографа выделяют непрерывно существующий поток – «базисный сток», характеризующийся как часть суммарного стока, поступающего из грунтовых вод [15–17]. Оценка изменчивости базисного стока позволит усовершенствовать научно-методический подход при расчете эксплуатационных запасов подземных вод [18–21]. Методы расчленения гидрографа, которые позволяют быстро и эффективно обрабатывать большие ряды данных, нашли наиболее широкое применение [18; 22–26]. Характерной особенностью зарубежных методов расчленения гидрографа является необходимость калибровки различных параметров, используемых при выделении базисного стока: коэффициента спада α , описывающего скорость уменьшения речного стока со временем, и индекса максимального базового стока BFI_{max} , принимающего значения от 0,2 до 0,8 в зависимости от проницаемости пород [23; 26–29].

Характерной особенностью гидрологического режима водных объектов России является высокая разница между расходами воды в период весеннего половодья и зимней межени, например, для реки Белой такая разница может достигать 27 раз [30; 31]. В свою очередь, базисный сток может составлять 80 % от суммарного речного стока в период межени [32]. В связи с этим необходимо прове-

сти исследования эффективности применения зарубежных методов расчленения гидрографа, которые наравне с расходом воды используют дополнительные параметры.

Таким образом, целью настоящего исследования является сравнительный анализ эффективности зарубежных методов выделения базисного стока для рассматриваемой речной сети бассейна реки Белой.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белой, расположенного на территории Южного Урала, Россия. Климат Южного Урала умеренно континентальный и характеризуется влажным теплым летом и суровой зимой. За год выпадает от 350 до 800 мм осадков. Снежный покров устанавливается во второй половине ноября и начинает сходить к середине апреля.

Река Белая протекает по всей территории Башкортостана, по границе с Удмуртией и Татарстаном. Питание реки, в основном, снеговое. Площадь бассейна – 142 000 км² (рис. 1).



Рис. 1. Бассейн реки Белой с обозначением географического расположения 10 гидрологических постов

Для проведения исследований использовались многолетние данные наблюдений за среднесуточным расходом воды на 10 гидрологических постах (рис. 1). Описание исследуемых данных наблюдений приведено в табл. 1.

Для исключения поверхностного стока, возникающего из-за продолжительных дождей или снеготаяния, введены следующие критерии:

1. Удаление значений расхода воды, соответствующих условию $dQ/dt \geq 0$, где dQ/dt определяется по формуле:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{Q_{n+1} - Q_{n-1}}{2}$$

2. После выполнения первого критерия необходимо удалить два предыдущих значения dQ/dt , удовлетворяющих условию ≥ 0 , и три после;

3. Идентификация и удаление 5 значений расхода реки после пика паводка (значение пика паводка соответствует 90-му процентилю всех значений расхода воды) [33; 34].

Полученные оставшиеся значения расхода воды использованы для определения наиболее эффективного метода выделения базисного стока. Графическая интерпретация оставшихся значений представлена на рис. 2.

Таблица 1

Характеристика рассматриваемых гидрологических постов

Гидрологический пост	Период наблюдения	Средний расход воды, м ³ /с	Площадь водосбора, км ²
Город Уфа (река Белая)	1936–2020 гг.	741,38	142000
Город Бирск (река Белая)	1936–2020 гг.	834,14	121000
Город Стерлитамак (река Белая)	1937–2020 гг.	122,57	21000
Село Метели (река Ай)	1938–2020 гг.	86,15	14200
Село Лаклы (река Ай)	1936–2020 гг.	43,97	6440
Дом отдыха Арский камень (река Белая)	1936–2020 гг.	14,31	2300
Деревня Таишево (река Большой Ик)	1952–1964 гг.; 1984–1997 гг.; 2000–2020 гг.	9,28	1450
Город Златоуст (река Ай)	1937–1979 гг.; 2008–2018 гг.	7,85	1120
Село Веселовка (река Ай)	2008–2018 гг.	3,61	586
Село Нижний Авзян (река Большой Авзян)	1976–1984 гг.; 2000–2020 гг.	4,95	507

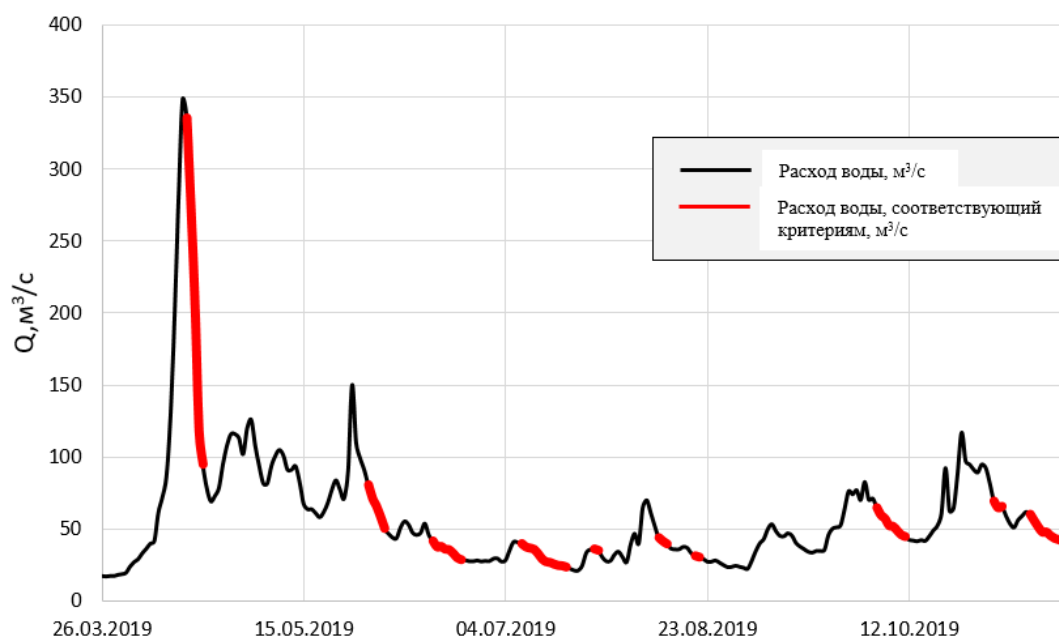


Рис. 2. Гидрограф реки Ай (село Лаклы): красной линией обозначены значения расхода воды, соответствующие введенным критериям и используемые для дальнейших расчетов

Для выделения базисного стока использовано 7 методов: фиксированного интервала (fixed interval), скользящего интервала (sliding interval), метод локальных минимумов (local minimum), Экхардта (Eckhard), Чапмана (Chapman), Чапмана и Максвелла (CM), Лайна и Холлика (LH) [18; 22; 27; 28; 35–37].

У каждого метода имеется свой собственный подход к определению параметра коэффициента спада α , индекса максимального базового стока BFI_{max} и количества дней N . Формула для расчета параметра N идентична для методов fixed interval, sliding interval и local minimum:

$$N = A^{0.2}$$

где A – площадь водосборного бассейна в квадратных милях [22].

Метод ЛН выделяет базисный сток по формуле:

$$f_k = \alpha f_{k-1} + \frac{1 + \alpha}{2} (y_k - y_{k-1})$$

где f_k – поверхностный сток, должен удовлетворять условию $f_k \geq 0$, м³/с, α – параметр, определяемый по методу, описанному в работе (Nathan and McMahon, 1990), и y_k – значение расхода в k -ый момент времени, м³/с. Значение f_k необходимо для определения базисного стока по формуле 4:

$$b_k = y_k - f_k$$

где b_k – значение базисного стока, м³/с [35; 36].

Метод Шарпан основан на предположении, что метод ЛН (уравнение 3) нецелесообразен при отсутствии поверхностного стока. Таким образом, при замене переменных уравнения 3 с помощью уравнения 4 получим:

$$b_k = \alpha b_{k-1} + \frac{1 - \alpha}{2} (f_k + f_{k-1}) (0 \leq b_k \leq y_k)$$

где параметр α для уравнения 5 можно рассчитать по методу Eckhardt [18; 27; 37].

Метод СМ использует среднее значение поверхностного стока и предыдущее значение базисного стока:

$$b_k = \frac{\alpha}{2 - \alpha} b_{k-1} + \frac{1 - \alpha}{2 - \alpha} y_k (0 \leq b_k \leq y_k)$$

где параметр α для уравнения 6 можно рассчитать по методу Eckhardt [18; 28].

В двухпараметрическом методе Eckhardt нужно определить параметры BFI_{max} и α :

$$b_k = \frac{(1 - BFI_{max})\alpha b_{k-1} + (1 - \alpha)BFI_{max}y_k}{1 - \alpha BFI_{max}}$$

где α – коэффициент спада. На основании работы (Eckhardt, 2005) на водосборе, сложенными скальными породами с постоянными реками, BFI_{max} равен 0,25, для водосборного бассейна с проницаемыми породами с временными реками и ручьями BFI_{max} равны 0,5 и сложенном хорошо проницаемыми породами с постоянными реками, значения BFI_{max} равны 0,8 [6; 18; 29]. В настоящем исследовании значение BFI_{max} принято равным 0,8.

Оценка эффективности зарубежных методов выделения базисного стока проводилась по коэффициенту эффективности модели Нэша – Сатклиффа (NSE), основанному на функции нормализации. Значения коэффициента эффективности NSE метода варьируются от $-\infty$ до 1 и определяется по следующей формуле:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=t_1, t_2, \dots, t_n} (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t=t_1, t_2, \dots, t_n} (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

где t_1, t_2, \dots, t_n – дата n -го значения расхода реки, Q_m^t – значения базисного стока, которые были получены после применения метода выделения базисного стока, м³/с, Q_0^t – значения расхода реки, полученные после применения трех критериев оценки, м³/с, \bar{Q}_0 – среднее значение всех полученных значений расхода реки после применения трех критериев оценки, м³/с [38–43].

Также среди исследователей для оценки эффективности методов выделения базисного стока распространен критерий Клинга-Гупты (KGE), значения которого варьируются от $-\infty$ до 1, определяемый по формуле:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}_m}{\bar{Q}_0} - 1\right)^2}$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона между значениями расхода реки и базисного стока, σ_0 – стандартное отклонение значений расхода реки, м³/с, σ_m – стандартное отклонение значений базисного стока, м³/с, \bar{Q}_0 – среднее значение всех полученных значений расхода реки после применения трех критериев оценки, м³/с, \bar{Q}_m – среднее значение базисного стока, м³/с [39–40].

Метод выделения базисного стока, значение NSE и KGE которого ближе всего располагается к 1, считается наиболее эффективным [39; 40; 42].

Результаты и их обсуждение

На основе методов расчленения гидрографа выделен базисный сток на 10 створах. В качестве примера приведен гидрограф реки Ай (село Лаклы) по данным среднесуточного расхода реки за 2020 год (рис. 3).

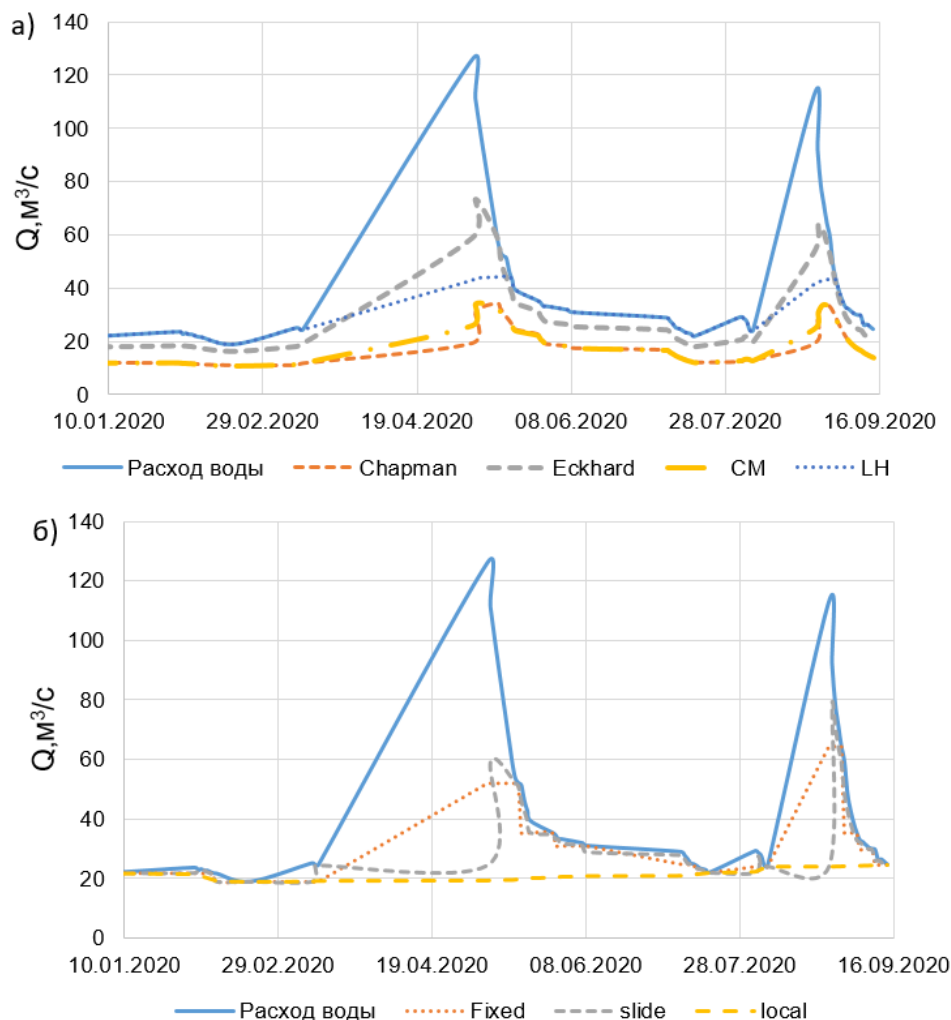


Рис. 3. Гидрограф реки Ай (село Лаклы). Выделение базисного стока выполнено следующими методами: а) Методы Chapman, Eckhardt, CM и LH. б) Методы fixed interval, sliding interval и local minimum

Как видно из рис. 3, метод local minimum сначала идентифицирует минимальные значения расхода реки, затем соединяет эти минимумы на гидрографе, а полученная линия интерпретируется как базисный сток. Хорошую сходимость значений базисного стока с расходом воды демонстрируют методы fixed interval, sliding interval, LH и Eckhardt.

Для каждого метода выделения базисного стока выполнен расчет показателей эффективности NSE и KGE. Результаты расчетов графически интерпретированы на рис. 4.

Значения медиан NSE для каждого метода, расположенных слева направо на рис. 4 (а), равны 0,32, 0,39, 0,81, 0,43, 0,33, -0,15 и 0,55 соответственно. Значения медиан KGE для каждого метода, расположенных слева направо на рис. 4 (б), равны 0,18, 0,19, 0,63, 0,44, 0,27, -0,32 и 0,54 соответственно. Таким образом, наибольшее медианное значение NSE и KGE продемонстрировал метод Eckhardt и, как следствие, он является наиболее эффективным.

Определены наибольшие значения NSE и KGE для каждого гидрологического поста. Результаты представлены в табл. 3.

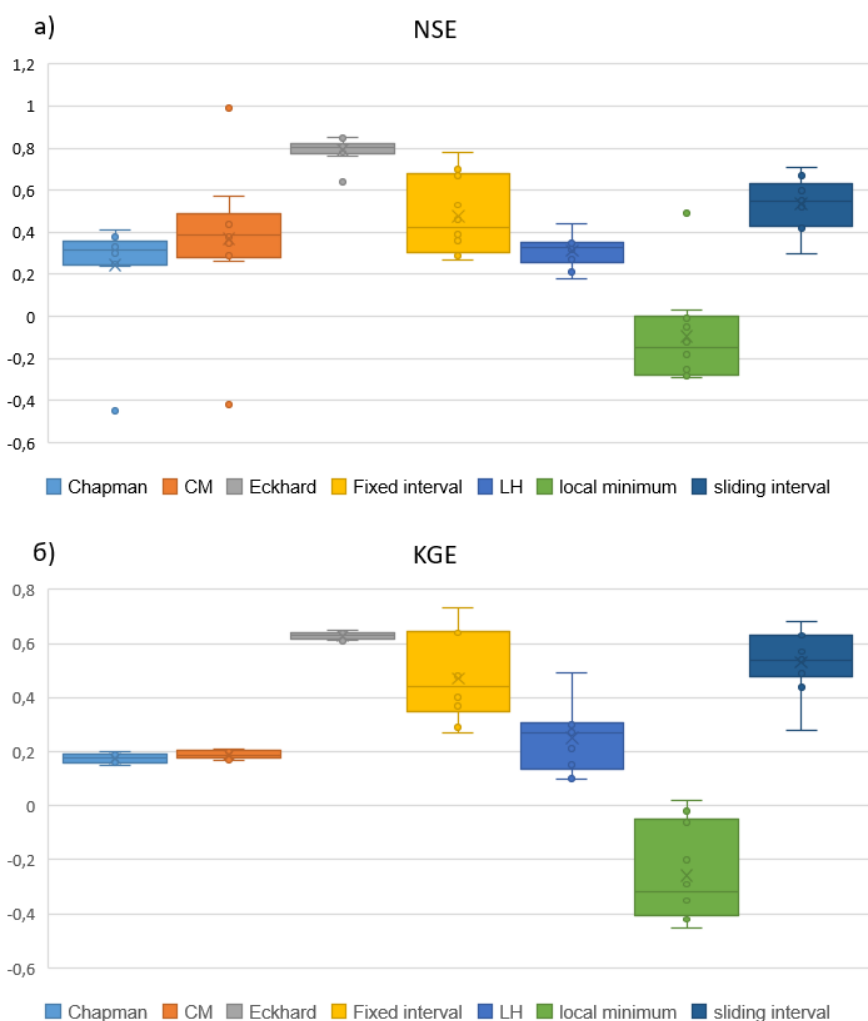


Рис. 4. Результаты оценки эффективности 7 методов выделения базисного стока рек бассейна реки Белой с помощью NSE (а) и KGE (б)

Таблица 3

Значения параметра α , а также NSE и KGE для каждого исследуемого гидрологического поста

Гидрологический пост	Метод	NSE	KGE	α (Eckhardt, 2005)	α (Nathan, 1990)	BFI _{max}
Село Нижний Авзян (река Большой Авзян)	Eckhardt	0,85	0,65	0,82	0,95	0,8
Деревня Таишево (река Большой Ик)	Eckhardt	0,81	0,64	0,83	0,92	0,8
	fixed interval	0,67	0,66			-*
Село Златоуст (река Ай)	Eckhardt	0,85	0,63	0,77	0,98	0,8
Село Веселовка (река Ай)	Eckhardt	0,8	0,63	0,88	0,95	0,8
	fixed interval	0,78	0,73			-
Село Лаклы (река Ай)	Eckhardt	0,79	0,61	0,84	0,99	0,8
Село Метели (река Ай)	Eckhardt	0,78	0,63	0,87	0,93	0,8
Город Стерлитамак (река Белая)	Eckhardt	0,81	0,64	0,87	0,93	0,8
Город Бирск (река Белая)	Eckhardt	0,76	0,62	0,93	0,96	0,8
Дом отдыха Арский камень (река Белая)	Eckhardt	0,81	0,61	0,84	0,95	0,8
Город Уфа (река Белая)	Eckhardt	0,64	0,62	0,92	0,96	0,8

Примечание: * – в методе fixed interval отсутствует параметр BFI_{max}.

Как видно из табл. 3, медианное значение KGE метода fixed interval для гидрологических постов деревни Таишево (река Большой Ик) и села Веселовка (река Ай) выше метода Eckhardt. По-видимому, это связано с водопроницаемостью горных пород на территории рассматриваемых гидрологических постов: водопроницаемость горных пород зависит от пористости и влияет на параметр BFI_{max} при использовании метода Eckhardt. В связи с этим, выполнен сравнительный анализ NSE и KGE при значении BFI_{max} , равном 0,2, с целью учета влияния горных пород на процесс формирования речного стока. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения параметра α , NSE и KGE для гидрологических постов деревни Таишево и села Веселовка

Гидрологический пост	Метод	NSE	KGE	α (Eckhardt, 2005)	α (Nathan, 1990)	BFI_{max}
Деревня Таишево (река Большой Ик)	Eckhardt	-0,23	-0,19	0,83	0,92	0,2
	fixed interval	0,67	0,66			-*
село Веселовка (река Ай)	Eckhardt	-0,1	-0,2	0,88	0,95	0,2
	fixed interval	0,78	0,73			-

Примечание: * – в методе fixed interval отсутствует параметр BFI_{max}

Сравнительный анализ NSE и KGE продемонстрировал, что метод fixed interval является наиболее эффективным для гидрологических постов деревни Таишево и села Веселовка соответственно.

Исследования эффективности методов выделения базисного стока широко распространены за рубежом [40; 42; 43]. Так, например, в работе (Jiaxin Xie и др., 2020) установлено, что метод Eckhardt наиболее эффективен при выделении базисного стока для 1145 гидрологических постов из 1815 и рекомендован к использованию на всей территории США [40]. Также проведено исследование по поиску наиболее эффективного метода выделения базисного стока в работе (Roya Narimani и др., 2023) для бассейна озера Урмия, Иран. Авторы отмечают высокую эффективность метода Eckhardt, большую чувствительность методов Eckhardt и LH к параметру коэффициент спада α [43]. Авторами (Rong Gan и др., 2022) проведен анализ эффективности методов выделения базисного стока для бассейна реки Юлио, Китай. Результаты исследования показали, что метод Charman является самым эффективным для рассматриваемого бассейна реки Юлио [42].

Стоит отметить, что в работах (Jiaxin Xie и др., 2020; Rong Gan и др., 2022; Roya Narimani и др., 2023) не учитывают влияние изменения параметров α , BFI_{max} и N на методы выделения базисного стока. Неоднозначность результатов при выделении базисного стока методом fixed interval с учетом изменения параметра N (количества дней) продемонстрирована в работе (Сучковой К.В., 2021), где объектом исследования являлся бассейн Можайского водохранилища [6].

Таким образом, следующим этапом работы по исследованию речной системы бассейна реки Белой является сравнительный анализ влияния параметров α , BFI_{max} и N на значения базисного стока.

Заключение

Проведенная оценка эффективности 7 различных методов выделения базисного стока с помощью коэффициента эффективности NSE и KGE позволила установить, что цифровой метод Eckhardt наиболее эффективен и может быть рекомендован к использованию для всей речной сети бассейна реки Белой. Однако, для гидрологических постов, расположенных в деревне Таишево (река Большой Ик) и селе Веселовка (река Ай), метод fixed interval показывает наибольшую эффективность по показателю KGE.

По-видимому, методы выделения базисного стока чувствительны к изменению параметров α , BFI_{max} и N , используемых в рассматриваемых методах. Следовательно, для лучшего понимания процессов формирования речного стока необходимо подробнее изучить влияние этих параметров на эффективность методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C. The natural flow regime. *Bioscience*, 1997, 47, pp. 769–784.

2. Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн речной поток - русло. СПб.: РГГМУ, 1999. 218 с.
3. Дубинина В.Г., Жукова С.В. Оценка возможных последствий строительства Багаевского гидроузла для экосистемы Нижнего Дона // Рыбное хозяйство. 2016. № 4. С. 20–30.
4. Дубинина В.Г., Никитина О.И. Об учете экологического фактора при управлении водными ресурсами водохранилищ. Водохранилища Российской Федерации: современные экологические проблемы, состояние, управление: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (г. Сочи, 23–29 сентября 2019 г.). Новочеркасск: Лик, 2019. С. 80–87.
5. Никитина О.И. Влияние регулирования стока на водные экосистемы бассейна амурского и меры по их сохранению: дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 2021. 147 с.
6. Сучкова К.В. Моделирование генетических составляющих речного стока на водосборе Можайского водохранилища: дис. ... канд. геогр. наук. Москва, 2021. 157 с.
7. Фашевский Б.В., Походня Г.В., Шевелюк Л.Н., Шулика Л.Г. Руководство по оценке экологически допустимых изменений водного режима рек. Минск: изд-во ЦНИИКИВР, 1993. 19 с.
8. Левин А.П., Терехин А.Т. Метод расчета экологически допустимых уровней воздействия на экосистемы // Водные ресурсы. 1997. № 3. С. 328–335.
9. Дубинина В.Г. Методические основы экологического нормирования безвозвратного изъятия речного стока и установления экологического стока (попуска). М.: Экономика и информатика, 2001. 118 с.
10. Иофин З.К. Экологическая обоснованность остаточного минимального расхода воды // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы научной конференции. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. С. 80–83.
11. Маркин В.Н. Оценка экологически допустимого стока малых рек // Мелиорация и водное хозяйство. 2005. № 6. С. 8–11.
12. Маркин В.Н., Раткович Л.Д., Соколов С.А. Внутригодовое распределение экологического стока малых рек. М., Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева, 2015. 77 с.
13. Данилов-Данильян В.И., Болгов М.В., Дубинина В.Г., Ковалевский В.С., Кочарян А.Г., Новикова Н.М. Оценка допустимых изъятий стока в бассейнах малых рек: основные методические положения // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 2. С. 224–238.
14. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ (утверждены приказом Минприроды России от 26 января 2011 г. № 17). [Электронный ресурс]. 2011. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902260669> (дата обращения: 20.11.2023).
15. Hall F.R. Base-flow recessions—A review // *Water Resour. Res.* 1968. 4 (5). Pp. 973–983.
16. Виссмен У. Введение в гидрологию. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 470 с.
17. Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis // *Journal of Hydrology*. 1995. 165. Pp. 349–370.
18. Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods // *J. Hydrol.* 2008. 352 (1–2). Pp. 168–173.
19. Price K. Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, and Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions. *A Review // Progress in Physical Geography*. 2011. 35 (4). Pp. 465–92.
20. Liu XY, Xie FF. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang river basin based on digital filtering method // *Water Resource and Protection*. 2017. 33(01). Pp. 18–23.
21. Liu Z, Liu SY, Ye JP, Sheng F, You KM, Xiong XH, Lai GL. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China // *Forests*. 2019. 10. 1065.
22. Sloto R. A., Crouse M. Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis // *Water-resources investigations report*. 1996. Vol. 96. P. 4040.
23. Arnold J.G., Allen P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records // *J. Am. Water Resour. Assoc.* 1999. 35 (2). Pp. 411–424.
24. Aksoy H., Kurt I., Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method // *J. Hydrol.* 2009. 372 (1–4). Pp. 94–101.
25. Zhang J., Zhang Y., Song J., Cheng L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia // *J. Hydrol.* 2017. 549. Pp. 252–263.
26. Gnant S.J., Woods R.A., Howden N.J.K. Is there a baseflow Budyko Curve? // *Water Resources Research*, 2019. 55 (4). Pp. 2838–2855.
27. Chapman T., McMahon T.A. Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan // *Water Resources Research*. 1991. 27 (7). Pp. 1783–1784.
28. Chapman T. G., Maxwell A. I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments // *Hydrology and water resources symposium 1996: Water and the environment; preprints of papers.* – Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1996. Pp. 539–545.
29. Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation // *Hydrol. Process.* 2005. 19 (2). Pp. 507–515.
30. Гареев А.М. Водные ресурсы Башкирии и их состояние. Уфа: Китап, 1978. 182 с.
31. Гареев А.М. Оптимальное планирование водоохраных мероприятий. Уфа: Китап, 1989. 230 с.

32. Miller M.P., Buto S.G., Susong D.D., Rumsey C.A. The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin // *Water Resources Research*. 2016. 52 (5). Pp. 3547–3562.
33. Brutsaert W. Long-term groundwater storage trends estimated from streamflow records: Climatic perspective // *Water Resources Research*. 2008. Vol. 44. № 2.
34. Cheng L., Zhang L., Brutsaert W. Automated selection of pure base flows from regular daily streamflow data: objective algorithm // *J. Hydrol. Eng*, 2016. 21 (11), 06016008 p.
35. Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling // Institute of engineers Australia national conference. – Barton, Australia: Institute of Engineers Australia, 1979. Vol. 79, № 10. Pp. 89-93
36. Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses // *Water Resources Research*, 1990. 26 (7). Pp. 1465–1473.
37. Mau D.P., Winter, T.C. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA // *Ground Water*. 1997. 35(2). Pp. 291–304.
38. Rimmer A., Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models // *J. Hydrol*, 2014. 514. Pp. 249–257.
39. Knoben W.J.M., Freer J.E., Woods R.A. Technical note: inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores // *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2019. 23 (10). Pp. 4323–4331.
40. Xie J., Liu X., Wang K., Yang T., Liang K., Liu C. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States // *J. Hydrol*. 2020. 583. 124628.
41. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2020. С. 176–189.
42. Gan R., Xu M., Yang F. et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China // *Environmental Earth Sciences*. 2022. Vol. 81, № 11. P. 323.
43. Narimani R., Jun C., Nezhad S.M., Bateni S.M., Lee J., Baik J. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran // *J. Hydrol*, 2023. 47. 101383.

Поступила в редакцию 12.02.2024

Хасанов Ильмир Ахнафович, аспирант 2 года обучения, ассистент кафедры безопасности производства и промышленной экологии*

E-mail: ilmir.hasanov.09@mail.ru

Елизарьев Алексей Николаевич, кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности производства и промышленной экологии*; научный сотрудник**

E-mail: elizarev.an@ugatu.su

Тараканов Денис Анатольевич, аспирант 3 года обучения, ассистент кафедры безопасности производства и промышленной экологии*

E-mail: tarakanov.da01@ugatu.su

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

450076, Россия, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32

**Институт водных проблем Российской академии наук

119333, Россия, г. Москва, ул. Губкина, 3

I.A. Khasanov, A.N. Elizaryev, D.A. Tarakanov

THE ASSESSMENT OF PERFORMANCE BASEFLOW SEPARATION METHOD IN THE BELAYA RIVER BASIN, RUSSIA

DOI: 10.35634/2412-9518-2024-34-1-85-95

The depletion of river water resources is associated with anthropogenic impact. It is necessary to choose the most effective baseflow separation method to understand the main sources of river during the dry period. Determining the main sources of river during the dry period will allow for the most accurate rationing of the quantitative use of river water resources to protect the river ecosystem. This study presents the results of using 7 baseflow separation methods. The object of the study is the river network of the Belaya River basin. The research material was based on long-term data from observations of daily water consumption from 10 hydrological posts. The result show that the Eckhardt methos has the best performance. Thus, Eckhardt method is recommended for baseflow separation across the river network of the Belaya river basin.

Keywords: baseflow separation method, streamflow, surface water, Nash–Sutcliffe efficiency, Kling–Gupta efficiency.

REFERENCES

1. Poff N.L., Allan J.D., Bain M.B., Karr J.R., Prestegard K.L., Richter B.D., Sparks R.E., Stromberg J.C. The natural flow regime, in *Bioscience*, 1997, vol. 47, pp. 769-784.
2. Baryshnikov N.B. *Antropogennoe vozdeystvie na samoreguliruyushchuyusya sistemu basseyn rechnoy potok - ruslo* [Anthropogenic impact on the self-regulating system of the river stream - channel basin], St. Petersburg: RGGMU, 1999, 218 p. (in Russ.).
3. Dubinina V.G., Zhukova S.V. [An assessment of possible consequences of Bagaevsky hydroelectric system construction for the Lower Don ecosystem], in *Rybnoe khozyaystvo*, 2016, no. 4, pp. 20-30 (in Russ.).
4. Dubinina V.G., Nikitina O.I. [Considering environmental factor in water resources management of reservoirs], in *Sborn. Mater. Vseross. Nauch.-prakt. Konf. "Vodokhranilishcha Rossiyskoy Federatsii: sovremennye ekologicheskie problemy, sostoyanie, upravlenie"*, Novocherkassk: Lik Publ., 2019, pp. 80-87 (in Russ.).
5. Nikitina O.I. [The impact of flow regulation on the aquatic ecosystems of the Amur basin and measures for their conservation], Cand. Geography sci. diss., Moscow, 2021, 147 p. (in Russ.).
6. Suchkova K.V. [Modeling of the genetic components of river flow in the catchment area of the Mozhaisk reservoir], Cand. Geography sci. diss., Moscow, 2021, 157 p. (in Russ.).
7. Fashchevskiy B.V., Pokhodnya G.V., Shevelyuk L.N., Shulika L.G. *Rukovodstvo po otsenke ekologicheski dopustimyykh izmeneniy vodnogo rezhima rek* [Guidelines for assessing environmentally acceptable changes in the water regime of rivers], Minsk: TsNIIKIVR Publ., 1993, 19 p. (in Russ.).
8. Levin A.P., Terekhin A.T. *Metod rascheta ekologicheski dopustimyykh urovney vozdeystviya na ekosistemy* [Method of calculating ecologically acceptable levels of impact on ecosystems], in *Vodnye resursy*, 1997, no. 3, pp. 328-335 (in Russ.).
9. Dubinina V.G. *Metodicheskie osnovy ekologicheskogo normirovaniya bezvozvratnogo iz'yatiya rechnogo stoka i ustanovleniya ekologicheskogo stoka (popuska)* [Methodological foundations of ecological rationing of irrevocable withdrawal of river runoff and establishment of ecological runoff], Moscow: Ekonomika i informatika, 2001, 118 p. (in Russ.).
10. Iofin Z.K. *Ekologicheskaya obosnovannost' ostatochnogo minimal'nogo raskhoda vody* [Ecological validity of the residual minimum water consumption], in *Mater. Nauch. Konf. "Fundamental'nye problemy izucheniya i ispol'zovaniya vody i vodnykh resursov"*, Irkutsk: Institut geografii SO RAN, 2005, pp. 80-83 (in Russ.).
11. Markin V.N. *Otsenka ekologicheski dopustimogo stoka malykh rek* [Assessment of the ecologically acceptable flow of small rivers], in *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo*, 2005, no. 6, pp. 8-11 (in Russ.).
12. Markin V.N., Ratkovich L.D., Sokolov S.A. *Vnutrigodovoe raspredelenie ekologicheskogo stoka malykh rek* [Intra-annual distribution of ecological runoff of small rivers], Moscow: Ross. Gos. Agrar. Univ. - MSKhA im. K.A. Timiryazeva, 2015, 77 p. (in Russ.).
13. Danilov-Danil'yan V.I., Bolgov M.V., Kovalevskii V.S., Kocharyan A.G., Novikova N.M., Dubinina V.G. [Assessment of admissible runoff withdrawals in small river basins: methodological principles], in *Vodnye resursy [Water Resources]*, 2006, vol. 33, no. 2, pp. 224-238 (in Russ.).
14. *Metodicheskie ukazaniya po razrabotke pravil ispol'zovaniya vodokhranilishch (utverzhdeny prikazom Minprirody Rossii ot 26 yanvarya 2011 g. № 17)* [Methodological guidelines for the development of rules for the use of reservoirs (approved by Order No. 17 of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation dated January 26, 2011)], Available: <http://docs.cntd.ru/document/902260669> (accessed: 20.11.2023) (in Russ.).
15. Hall F.R. Base-flow recessions—A review, in *Water Resour. Res.*, 1968, vol. 4, no. 5, pp. 973-983.
16. Vissmen U. *Vvedenie v gidrologiyu* [Introduction to hydrology], Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979, 470 p. (in Russ.).
17. Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis, in *Journal of Hydrology*, 1995, vol. 165, pp. 349-370.
18. Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods, in *J. Hydrol.*, 2008, vol. 352, no. 1-2, pp. 168-173.
19. Price K. Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, and Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions: A Review, in *Progress in Physical Geography*, 2011, vol. 35, no. 4, pp. 465-492.
20. Liu X, Xie F. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang river basin based on digital filtering method, in *Water Resource and Protection*, 2017, vol. 33, no. 01, pp. 18-23.
21. Liu Z, Liu Sy, 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, in *Forests*, 2019, vol. 10, 1065 p.
22. Sloto R. A., Crouse M. Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis, in *Water-resources investigations report*, 1996, vol. 96, 4040 p.
23. Arnold J.G., Allen P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records, in *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 1999, vol. 35, no. 2, pp. 411-424.
24. Aksoy H., Kurt I., Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method, in *J. Hydrol.*, 2009, vol. 372, no. 1-4, pp. 94-101.

25. Zhang J., Zhang Y., Song J., Cheng L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia, in *J. Hydrol*, 2017, vol. 549, pp. 252-263.
26. Gnant S.J., Woods R.A., Howden N.J.K. Is there a baseflow Budyko Curve?, in *Water Resources Research*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 2838-2855.
27. Chapman T., McMahon T.A. Comment on "Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses" by R. J. Nathan, in *Water Resources Research*, 1991, vol. 27, no. 7, pp. 1783-1784.
28. Chapman T. G., Maxwell A. I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments, in *Hydrology and water resources symposium 1996: Water and the environment; preprints of papers, Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia*, 1996, pp. 539-545.
29. Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation, in *Hydrol. Process*, 2005, vol. 19, no. 2, pp. 507-515.
30. Gareev A.M. *Vodnye resursy Bashkirii i ikh sostoyanie* [Bashkiria's water resources and their condition], Ufa: Kitap Publ., 1978, 182 p. (in Russ).
31. Gareev A.M. *Optimal'noe planirovanie vodookhrannykh meropriyatii* [Optimal planning of water protection measures], Ufa: Kitap, 1989, 230 p. (in Russ).
32. Miller M.P., Buto S.G., Susong D.D., Rumsey C.A. The importance of base flow in sustaining surface water flow in the Upper Colorado River Basin, in *Water Resources Research*, 2016, vol. 52, no. 5, pp. 3547-3562.
33. Brutsaert W. Long-term groundwater storage trends estimated from streamflow records: Climatic perspective, in *Water Resources Research*, 2008, vol. 44, no. 2.
34. Cheng L., Zhang L., Brutsaert W. Automated selection of pure base flows from regular daily streamflow data: objective algorithm, in *J. Hydrol. Eng*, 2016, vol. 21, no. 11, 06016008.
35. Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, in *Institute of engineers Australia national conference*, Barton, Australia: Institute of Engineers Australia, 1979, vol. 79, no. 10, pp. 89-93.
36. Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses, in *Water Resources Research*, 1990, vol. 26, no. 7, pp. 1465-1473.
37. Mau D.P., Winter, T.C. Estimating ground-water recharge from streamflow hydrographs for a small mountain watershed in a temperate humid climate, New Hampshire, USA, in *Ground Water*, 1997, vol. 35, no. 2, pp. 291-304.
38. Rimmer A., Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models, in *J. Hydrol*, 2014, vol. 514, pp. 249-257.
39. Knoben W.J.M., Freer J.E., Woods R.A. Technical note: inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores, in *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 2019, vol. 23, no. 10, pp. 4323-4331.
40. Xie J., Liu X., Wang K., Yang T., Liang K., Liu C. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States, in *J. Hydrol*, 2020, vol. 583, 124628.
41. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. [Efficiency of streamflow modeling and forecasting], in *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2020, pp. 176-189 (in Russ.).
42. Gan R., Xu M., Yang F. et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China, in *Environmental Earth Sciences*, 2022, vol. 81, no. 11, p. 323.
43. Narimani R., Jun C., Nezhad S.M., Bateni S.M., Lee J., Baik J. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran, in *J. Hydrol*, 2023, vol. 47. 101383.

Received 12.02.2024

Khasanov I.A., Second Year Postgraduate Student of Department of Production Safety and Industrial Ecology*
E-mail: ilmir.hasanov.09@mail.ru

Elizaryev A.N., Candidate of Geography, Associate professor, Head of the Department of Production Safety and Industrial Ecology*; Researcher**
E-mail: elizaryev.an@ugatu.su

Tarakanov D.A., Third Year Postgraduate Student, Department of Production Safety and Industrial Ecology*
E-mail: tarakanov.da01@ugatu.su

*Ufa University of Science and Technology, Russia, Republic of Bashkortostan
Zaki Validi st., 32, Ufa, Russia, 450076

**Water Problem Institute of the Russian Academy of Sciences
Gubkina st., 3, Moscow, Russia, 119333