

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
МЕТОДОВ РАСЧЛЕНЕНИЯ
ГИДРОГРАФА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ
ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ПРИМЕРЕ
БАССЕЙНА РЕКИ БЕЛОЙ**

И.А. Хасанов¹, А.Н. Елизарьев^{1,2},
Д.А. Тараканов¹, Дм. А. Тараканов¹

¹Уфимский университет науки и технологий,
г. Уфа, Россия; ²Институт водных проблем
Российской академии наук, г. Москва, Россия

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

**OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF
HYDROGRAPH DISSECTION METHODS
TO INCREASE THEIR EFFECTIVENESS
ON THE EXAMPLE OF THE BELAYA
RIVER BASIN**

Ilmir A. Khasanov¹, Alexey N. Elizaryev^{1,2},
Denis A. Tarakanov¹, Dmitry A. Tarakanov¹

¹University of Science and Technology, Ufa, Russia;
²Institute of Water Problems RAS, Moscow, Russia

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

Аннотация. Регулирование стока оказало серьезное негативное воздействие на водные экосистемы, что подтолкнуло к проведению исследований последствий изменений водного режима в различных водных и пойменных экосистемах. Особое внимание следует уделить анализу воздействия антропогенных факторов на сток в период межени. Определение основных источников питания реки в период межени позволит проводить наиболее точное нормирование количественного использования водных ресурсов рек.

В данной работе представлены результаты оптимизации параметров семи методов расчленения гидрографа для повышения их эффективности выделения базисного стока. Для выделения базисного стока применены следующие методы: фиксированного интервала, скользящего интервала, метод локальных минимумов, Экхардта, Чапмана, Чапмана и Максвелла, Лайна и Холлика. Особенностью данных методов является применение различных параметров, используемых при выделении базисного стока: индекса максимального базисного стока BFI_{max} , принимающего значения от 0,2 до 0,8 в зависимости от проницаемости пород, коэффициента спада α , описывающего скорость уменьшения речного стока со временем, и N , количество дней. Оценка эффективности оптимизации параметров методов

Abstract. Dam construction and other human activities have changed the flow patterns of many rivers. The study focuses on the river network of the Belaya River basin in the Southern Urals, Russia, utilizing extensive multi-year observations of daily water discharge at 10 hydrological stations. Seven baseflow separation methods, including fixed interval, sliding interval, local minimum, Eckhardt, Chapman, Chapman and Maxwell, and Lyne and Hollick methods, were employed. To delineate baseflow, the recession coefficient α was determined using four approaches: 1) analysis of the recession curve obtained by averaging annual values; 2) construction of a point diagram of water discharge; 3) statistical analysis of water discharge; and 4) averaging all values of the recession coefficient α . The effectiveness of these methods was evaluated using the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) and Kling-Gupta Efficiency (KGE) metrics. The evaluation of the effectiveness of foreign baseflow separation methods was conducted using the Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient. Additionally, the Kling-Gupta Efficiency criterion, commonly used among researchers, was applied. The assessment revealed that the Eckhardt method proves most effective when applying parameters α and BFI_{max} (at BFI_{max} equal to 0.8). However, the Eckhardt method with BFI_{max} equal to 0.2 shows the lowest Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient and Kling-Gupta Efficiency

выделения базисного стока проведена с использованием коэффициента эффективности Нэша-Сатклиффа, а также критерия эффективности Клинга-Гупты.

Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белой. Материалом исследования послужили многолетние данные наблюдений за ежедневным расходом воды с 10 гидрологических постов. Установлено, что метод Экхардта наиболее эффективен при применении параметров α и BF_{\max} (при BF_{\max} , равном 0,8). Однако метод Экхардта при BF_{\max} , равном 0,2, показывает самые низкие значения коэффициентов эффективности, что говорит о нецелесообразности его применения на водосборе, сложенного скальными породами. В свою очередь метод скользящего интервала наиболее эффективен при применении параметра N , значение которого необходимо уменьшать на 1 день. Следовательно, методы Экхардта и скользящего интервала могут быть рекомендованы к использованию для всей речной сети бассейна реки Белая.

Ключевые слова: метод выделения базисного стока; поверхностный сток; речной сток; коэффициента спада; индекс максимального базового стока; коэффициент эффективности модели Нэша – Сатклиффа; критерий Клинга-Гупты.

Введение

Изучение пресноводных ресурсов указывает на серьезное снижение численности популяций различных видов водных организмов, что представляет угрозу для экосистем и их устойчивости. Согласно данным индекса живой планеты за 2020 г., численность популяций фауны пресноводных видов в среднем уменьшилась на 84 % с начала 1970-х гг.¹ Строительство плотин, наряду с другими антропогенными воздействиями, вызвало изменения в режиме стока многих рек [Poff et al., 1997; Барышников, 1999; Дубинина, Жукова, 2016; Дубинина,

criterion values, indicating its impracticality in watersheds with rocky substrates. Conversely, the sliding interval method is most effective with a parameter N requiring a one-day reduction. Consequently, the Eckhardt and sliding interval methods are recommended for the entire river network of the Belaya River basin. Despite this, it is noteworthy that the fixed interval and Lyne and Hollick methods also demonstrated high Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient and Kling-Gupta Efficiency criterion values, offering valuable options for consideration in water resource management.

Keywords: baseflow separation method; surface water; streamflow; recession constant; index of the maximum baseflow; Nash–Sutcliffe efficiency; Kling–Gupta efficiency.

Никитина, 2019; Никитина, 2021]. Эти изменения привели к обеднению и смене видового состава рек, что сделало водные экосистемы малоустойчивыми перед воздействием как природных, так и антропогенных факторов. Регулирование стока оказало серьезное негативное воздействие на водные экосистемы, что подтолкнуло к проведению исследований последствий изменений водного режима в различных водных и пойменных экосистемах [Никитина, 2021]. Особое внимание следует уделить анализу воздействия антропогенных факторов на речной сток в межень, поскольку этот период характеризуется особым дисбалансом

¹ WWF. Living Planet Report 2020: Bending the Curve of Biodiversity Loss: A Deep Dive into Freshwater [Электронный ресурс]. – 2020. – Режим доступа: https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2020-09/LPR2020_freshwater.pdf. Дата обращения: 20.11.2023.

между внешними воздействиями и естественными процессами. Антропогенные воздействия в этот период могут привести к нехватке водных ресурсов в речных системах, что в свою очередь может негативно сказаться как на устойчивости экосистем, так и устойчивого обеспечения водой сельскохозяйственных и промышленных предприятий.

При расчленении гидрографа отмечают сток реки, который постоянно поддерживается подземными водами – «базисный сток» [Hall, 1968; Виссмен, 1979; Tallaksen, 1995]. Базисный сток является ключевым элементом в формировании устойчивого стока реки, особенно в периоды отсутствия атмосферных осадков. Исследование базисного стока позволяет понять, как подземные воды влияют на поддержание водных экосистем, качество воды и управление водных ресурсов [Eckhardt, 2008; Price, 2011; Liu, Xie, 2017; Liu et al., 2019]. Существует несколько методов выделения базисного стока, которые нашли широкое применение в гидрологических исследованиях и позволяют быстро и эффективно обрабатывать большие ряды данных [Eckhardt, 2008; Sloto, Crouse, 1996; Arnold, Allen, 1999; Aksoy, Kurt, Eris, 2009; Zhang et al., 2017; Gnann, Woods, Howden, 2019]. Особенностью данных методов является применение различных параметров, используемых при выделении базисного стока: индекса максимального базового стока BFI_{max} , принимающего значения от 0,2 до 0,8 в зависимости от проницаемости пород, коэффициента спада α , описывающего скорость уменьшения речного стока со временем, и количество дней N [Arnold, Allen, 1999; Gnann, Woods, Howden, 2019; Chapman, 1991; Chapman, Maxwell, 1996; Eckhardt, 2005]. Калибровка параметров BFI_{max} и α является неотъемлемой частью гидрологических исследований, направленных на выделение базисного стока, и обеспечивает адаптацию методов к конкретным условиям каждого водосбора, что, в свою очередь, повышает достоверность результатов и позволяет учитывать уникальные гидрологические особенности каждой территории [Yang, Choi, Lim, 2018; He S. et al., 2022; Хасанов, Елизарьев, Тараканов, 2024].

Использование дополнительных параметров и оптимальный подбор их значений позволяет

учесть сложные взаимодействия между различными компонентами водосбора. Это особенно актуально для ситуаций, когда на водных объектах России наблюдается высокая разница между расходами воды в период весеннего половодья и зимней межени. Например, для реки Белая, протекающей рядом с городом Уфа, такая разница может достигать 27 раз [Гареев, 1978; Гареев, 1989]. Использование различных методов выделения базисного стока позволит определить более адаптированный подход к изучению гидрологических процессов, что является ключевым элементом для эффективного управления водными ресурсами.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка влияния подбора параметров методов расчленения гидрографа на эффективность выделения базисного стока для рассматриваемой речной сети бассейна реки Белая.

Методика исследования

Объектом исследования является речная сеть бассейна реки Белая, расположенного на территории Южного Урала, Россия. Климат Южного Урала умеренно континентальный, 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 преимущественно снеговое. Площадь бассейна реки Белой составляет 142 000 км² (рисунок 1).

Для проведения исследований использовались многолетние данные наблюдений за среднесуточным расходом воды на 10 гидрологических постах (рисунок 1). Для выделения базисного стока использовано 7 методов: фиксированного интервала (fixed interval), скользящего интервала (sliding interval), метод локальных минимумов (local minimum), Экхардта (Eckhardt), Чапмана (Chapman), Чапмана и Максвелла (CM), Лайна и Холлика (LH) [Eckhardt, 2008; Sloto, Crouse, 1996; Chapman, 1991; Chapman, Maxwell, 1996; Lyne, Hollick, 1979; Nathan, McMahon, 1990; Mau, Winter, 1997].

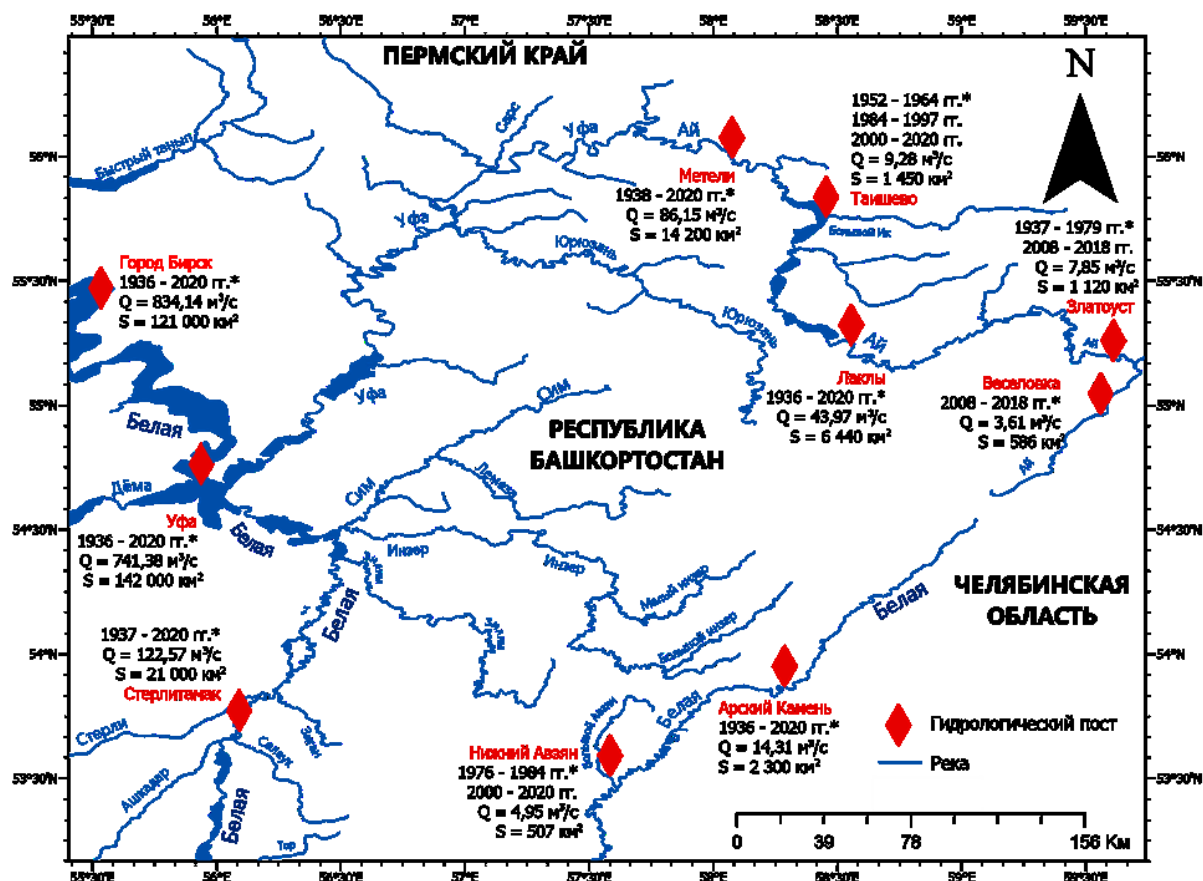


Рисунок 1. Бассейн реки Белая с обозначением географического расположения 10 гидрологических постов.

На рисунке: * – период наблюдений, гг., Q – средний расход воды, м³/с и S – площадь водосбора, км²

Figure 1. The Belaya River basin with the designation of the geographical location of 10 hydrological posts. Shown in the picture: * – observation period, years, Q – average water discharge, м³/s and S – catchment area, км²

Для выделения базисного стока по методам Eckhard, Charman, CM и LH необходимо определить параметр коэффициента спада α , который описывает скорость уменьшения речного стока со временем и может быть определен 4 различными методами:

1. Анализ кривой спада, полученной путем усреднения соответствующих значений кривых спада за каждый год всего периода наблюдения (NH);
2. Построение точечной диаграммы расхода воды Q_{j+1} от Q_j (Eckhardt);
3. Применение статистического анализа расхода воды Q_{j+1}/Q_j (BH);
4. Усреднение всех полученных значений коэффициента спада α [He et al., 2022; Nathan, McMahon, 1990; Brodie, Hostetler, 2005; Rimmer, Hartmann, 2014]. Стоит также отметить, что метод Eckhardt проанализирован с изменением параметра BFI_{max} . Параметр BFI_{max} равен 0,25 для водосбора, сложенного скальными породами, и

0,8 – для сложенного хорошо проницаемыми породами [Eckhardt, 2005; Knob, Freer, Woods, 2019].

Методы fixed interval, sliding interval и local minimum используют идентичный подход при определении параметра N (количества дней):

$$N = A^{0.2} \quad (1)$$

где A – площадь водосборного бассейна в квадратных милях [14]. Однако авторы [Sloto, Crouse, 1996, Сучкова, 2021] отмечают увеличение или уменьшение значений базисного стока при изменении параметра N. Таким образом, необходимо выполнить оценку влияния параметра N на выделение базисного стока с помощью изменения количества дней:

1. N меньше расчетного на 1 день (N-1);
2. N больше расчетного на 1 день (N+1);
3. N расчетное по формуле (1) (N);
4. N больше расчетного на 2 дня (N+2).

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:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t1, t2, \dots, tn} (Q_m^t - Q_0^t)^2}{\sum_{t1, t2, \dots, tn} (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2} \quad (2)$$

где $t1, t2, \dots, tn$ – дата n -го значения расхода воды, Q_m^t – значения базисного стока, которые были получены после применения метода выделения базисного стока, m^3/c , Q_0^t – значения расхода реки полученные после применения трех критериев оценки, m^3/c , \bar{Q}_0 – среднее значение всех полученных значений расхода реки после применения трех критериев оценки, m^3/c [Rimmer, Hartmann, 2014; Knoben, Freer, Woods, 2019; Xie et al., 2020; Борщ, Симонов, Христофоров, 2020; Gan et al., 2022; Narimani et al., 2023].

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:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{Q}_m}{\bar{Q}_0} - 1\right)^2} \quad (3)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона между значениями расхода реки и базисного стока, σ_0 – стандартное отклонение значений расхода реки, m^3/c , σ_m – стандартное отклонение значений базисного стока, m^3/c , \bar{Q}_0 – среднее значение всех полученных значений расхода реки после применения трех критериев оценки, m^3/c , \bar{Q}_m – среднее значение базисного стока, m^3/c [Knoben, Freer, Woods, 2019; Xie et al., 2020].

Метод выделения базисного стока, значение NSE и KGE которого ближе всего располагается к 1 считается наиболее эффективным [Knoben, Freer, Woods, 2019; Xie et al., 2020; Gan, 2022].

Результаты и их обсуждение

Расчленение гидрографа и выделение базисного стока на 10 створах выполнено при различных значениях параметра коэффициента спада α (таблица 1).

Таблица 1. Значениях параметра коэффициента спада α для каждого гидрологического поста
Table 1. Values of the decline coefficient parameter α for each hydrological post

Метод определения параметра α	Гидрологический пост									
	Город Уфа	Город Бирск	Город Стерлитамак	Село Метели	Село Лаклы	Дом отдыха Арский камень	Деревня Таишево	Город Златоуст	Село Вesselовка	Село Нижний Авзян
NH	0,99	0,99	0,99	0,94	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99	0,99
BH	0,94	0,95	0,93	0,91	0,97	0,94	0,89	0,95	0,89	0,90
Eckhardt	0,95	0,95	0,87	0,92	0,93	0,84	0,80	0,78	0,88	0,77
Среднее значение	0,92	0,96	0,93	0,92	0,96	0,93	0,90	0,9	0,92	0,89

Как видно из рисунка 2, хорошую сходимость значений базисного стока с расходом воды демонстрируют методы sliding interval, fixed interval, LH и Eckhardt (при BFI_{max}, равном 0,8). Исключением являются методы local minimum и Eckhardt (при BFI_{max}, равном 0,2). Метод local minimum отмечает минимальные значения расхода реки, затем соединяет эти минимумы на

гидрографе, а полученная линия интерпретируется в качестве базисного стока. Стоит также отметить большую разницу между значениями базисного стока при применении метода Eckhardt.

Для каждого метода выделения базисного стока выполнен расчет показателей эффективности NSE и KGE с учетом различных

значений параметров коэффициента спада α , количества дней N . Результаты расчетов индекса максимального базового стока BFI_{max} и графически интерпретированы на рисунке 3.

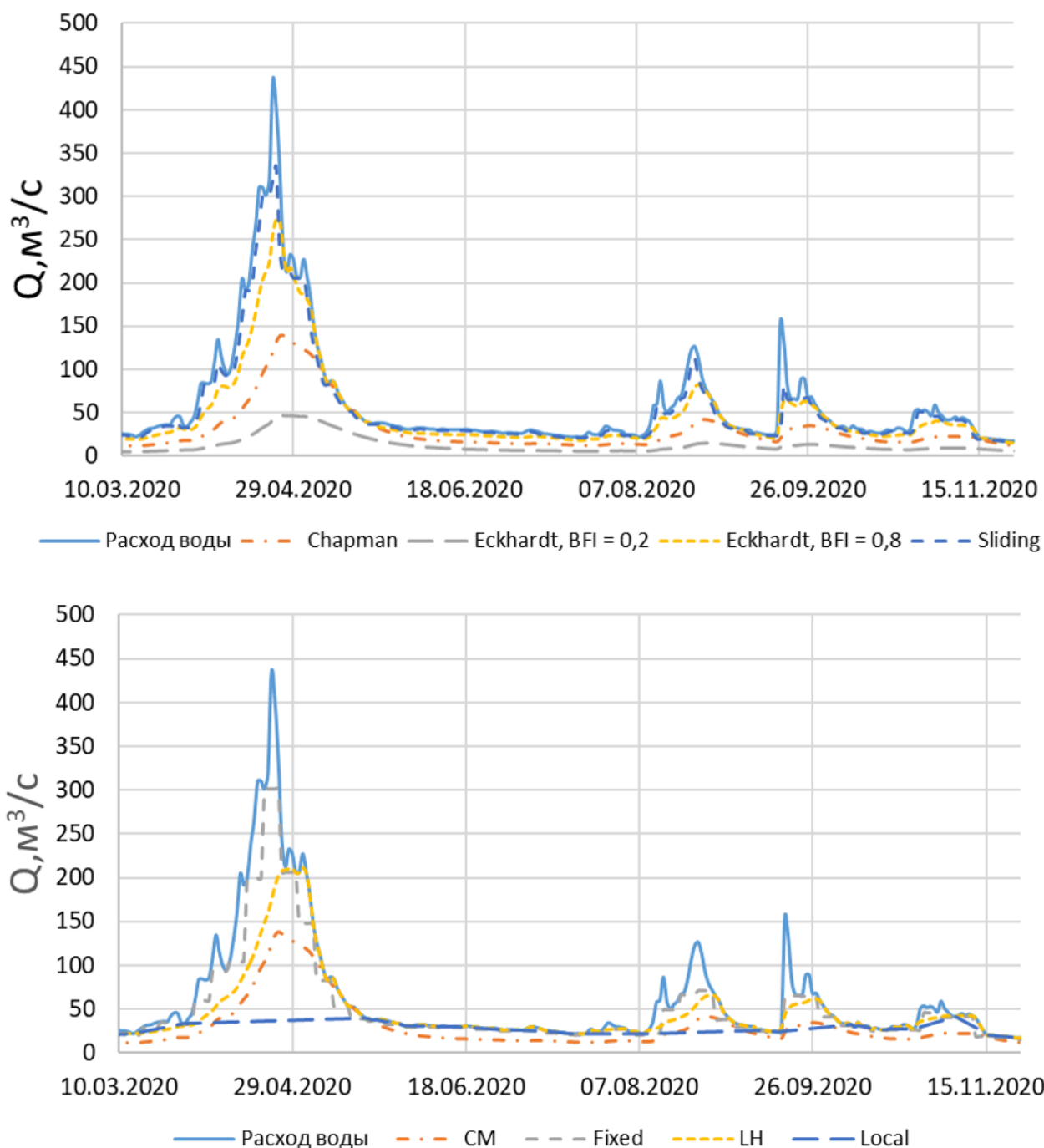
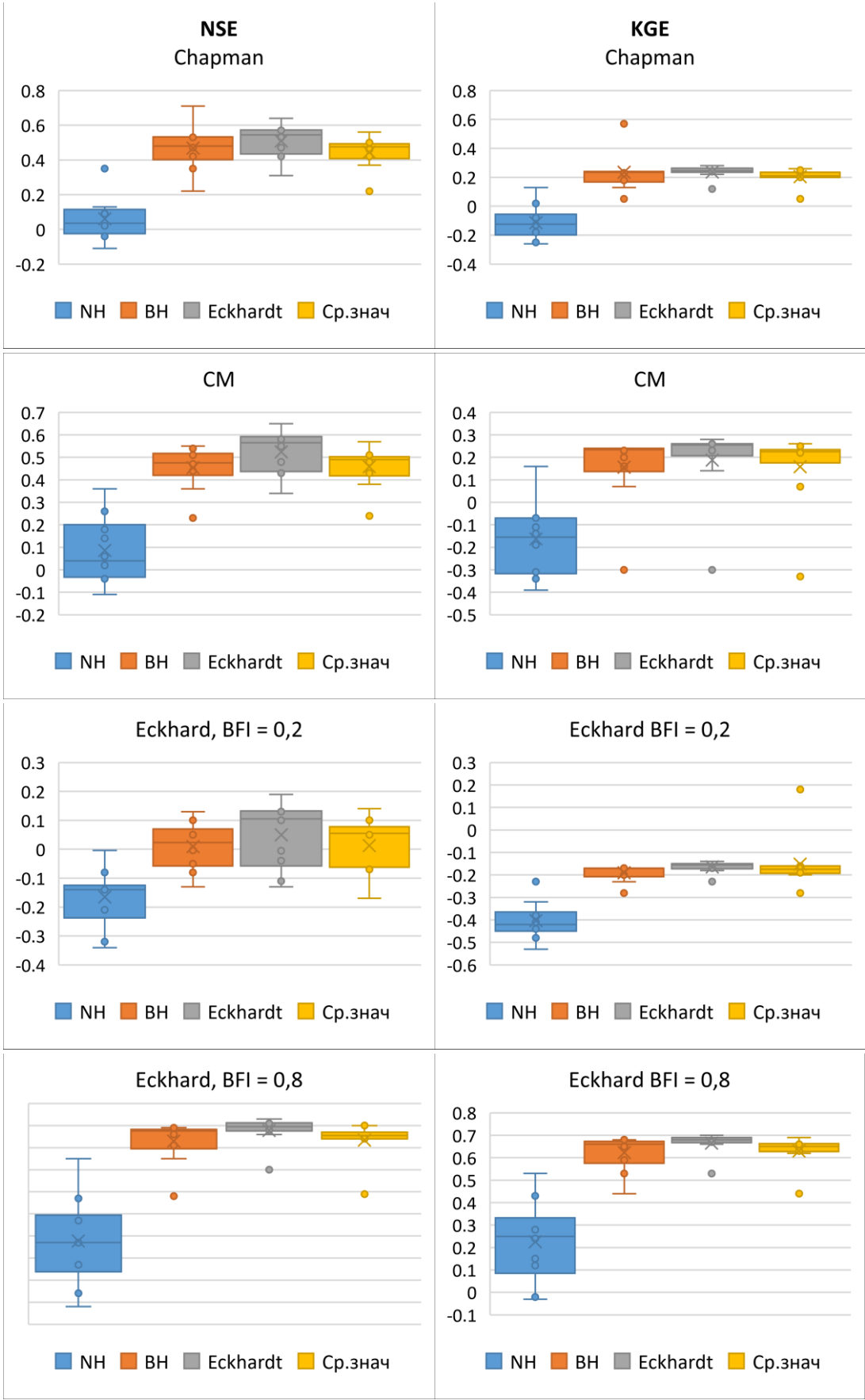


Рисунок 2. Гидрограф реки Ай (село Лаклы). Выделение базисного стока выполнено следующими методами: а) Методы Chapman, Eckhardt ($BFI_{max} = 0,2$), Eckhardt ($BFI_{max} = 0,8$), sliding interval. б) Методы fixed interval, и local minimum, CM и LH

Figure 2. Hydrograph of the Ai River (Lakly village). The allocation of the basic runoff is performed by the following methods: a) Chapman, Eckhardt ($BFI_{max} = 0.2$), Eckhardt ($BFI_{max} = 0.8$), sliding interval methods. b) Fixed interval, and local minimum, CM and LH methods

Значения медиан NSE для каждого рассматриваемого в данном исследовании метода, расположенных ближе всего к 1, при различных параметрах α , BFI_{max} и N приведены в таблице 2.



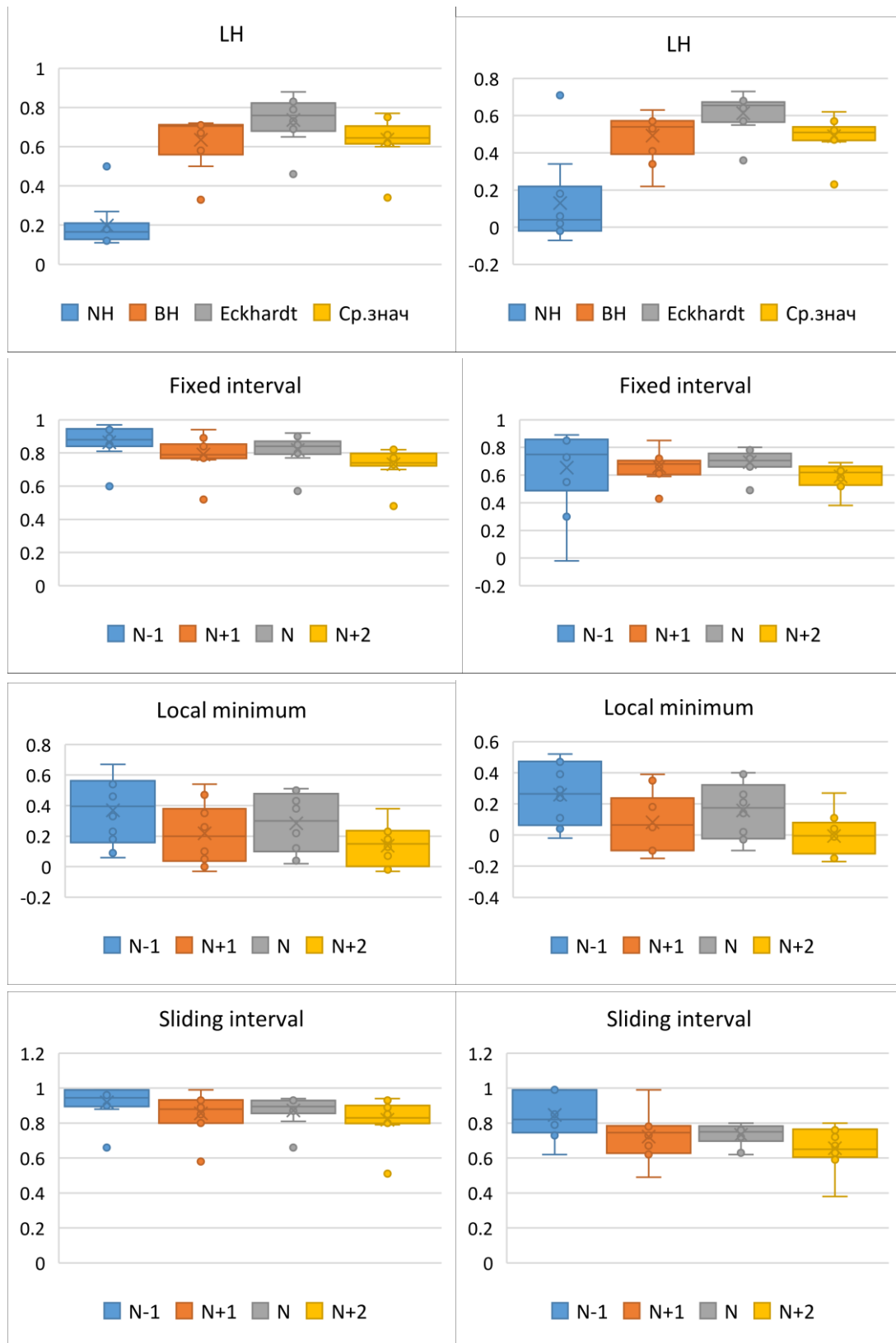


Рисунок 3. Результаты оценки эффективности 7 методов выделения базисного стока по с помощью коэффициентов NSE и KGE при различных значениях параметров коэффициента спада α , индекса максимального базового стока BFI_{max} и количества дней N

Figure 3. The results of evaluating the efficiency of 7 methods baseflow separation using the NSE and KGE coefficients at different values for the parameters of the decrease coefficient α , the maximum baseflow BFI_{max}, and the number of days N

Таблица 2. Значения медиан NSE для каждого рассматриваемого в данном исследовании метода, расположенных ближе всего к 1, при различных параметрах α , BFI_{max} и N

Table2. The values of the median NSE for each method considered in this study, located closest to 1, for different parameters α , BFI_{max} and N

№ п/п	Метод выделения базисного стока	Метод определения параметра α , BFI _{max} и N (NSE/KGE)	NSE	KGE
1	Chapman	Eckhardt/Eckhardt	0,55	0,25
2	CM	Eckhardt/Eckhardt	0,57	0,26
3	Eckhardt (BFI _{max} = 0,2)	Eckhardt/Eckhardt	0,11	-0,16
4	Eckhardt (BFI _{max} = 0,8)	Eckhardt/Eckhardt	0,9	0,68
5	Fixed interval	N меньше расчетного на 1 день*	0,88	0,75
6	LH	Eckhardt/Eckhardt	0,76	0,66
7	Local minimum	N меньше расчетного на 1 день	0,4	0,27
8	Sliding interval	N меньше расчетного на 1 день	0,95	0,82

* - параметр N определяется с помощью формулы (2)

Исследования эффективности методов выделения базисного стока и влияния параметров α , BFI_{max} и N на значения базисного стока широко проводятся и за рубежом [Yang, Choi, Lim, 2018; He et al., 2022]. Так, например, в работе [Yang et al., 2018] установлено оптимальное значение параметра коэффициента спада α для национального экспериментального леса в Почуне, Кенгидо, Южная Корея. Установлено, что оптимальный параметр коэффициента спада α может принимать значения 0,85 и 0,92 для хвойных и лиственных лесов. В качестве основного метода выделения базисного стока использовался метод Eckhardt. В работе [Shengjia et al., 2022] проведено исследование по поиску оптимального значения параметра α и BFI_{max} для реки Южный Тяо, Китай. Результаты исследования показали, что оптимальное значение параметра α варьируется в диапазоне от 0,91 до 0,97 для годового и от 0,89 до 0,98 для ежемесячного коэффициента спада. Значение NSE для среднесуточного, ежемесячного и годового коэффициента спада α составляет 0,8, 0,78 и 0,67 соответственно. Для определения оптимального значения BFI_{max} авторы предлагают использовать генетический алгоритм [Katoch, Chauhan, Kumar, 2021].

Стоит отметить, что в работах [Yang et al., 2018; He S. et al., 2022] не учитывается влияние изменения осадков на методы выделения базисного стока.

Заключение

Таким образом, проведенная оценка эффективности 7 различных методов выделения базисного стока с помощью коэффициента эффективности NSE и KGE позволила установить, что метод Eckhardt наиболее эффективен при применении параметров α и BFI_{max} (при BFI_{max}, равном 0,8). Однако метод Eckhardt при BFI_{max}, равном 0,2, показывает самые низкие значения NSE и KGE, что говорит о нецелесообразности его применения на водосборе, сложенного скальными породами. В свою очередь метод sliding interval наиболее эффективен при применении параметра N, значение которого необходимо уменьшать на 1 день. Следовательно, метод Eckhardt и sliding interval могут быть рекомендованы к использованию для всей речной сети бассейна реки Белая. Несмотря на это следует отметить, что методы fixed interval и LH также продемонстрировали высокие значения NSE и KGE.

По результатам сравнительного анализа влияния параметров α , BFI_{max} и N на значения базисного стока, как следствие, на NSE и KGE установлено:

1. Метод NH по определению параметра α значительно снижает эффективность методов Chapman, CM, Eckhardt (при BFI_{max} = 0,2 и 0,8) и LH;

2. Расчет параметра α с помощью метода Eckhardt позволяет выделить базисный сток с самой высокой эффективностью при

использовании методов Chapman, CM, Eckhardt (при $BFI_{max} = 0,8$) и LH;

3. Применение методов fixed interval, local minimum и sliding interval, главным критерием которых выступает параметр N, наиболее эффективны при уменьшении расчетного значения параметра N на 1 день.

Литература

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. Vol. 47. P. 769–784.

Барышников Н.Б. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн речной поток – русло. СПб.: РГГМУ. 1999. 218 с.

Дубинина В.Г., Жукова С.В. Оценка возможных последствий строительства Багаевского гидроузла для экосистемы Нижнего Дона // *Рыбное хозяйство*. 2016. № 4. С. 20–30.

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. 80–86.

Никитина О.И. Влияние регулирования стока на водные экосистемы бассейна амурского и меры по их сохранению: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36. – Институт водных проблем российской академии наук, Москва. 2021. 147 с.

Hall F.R. Base-flow recessions – A review // *Water Resour. Res.* 1968. Vol. 4 (5). P. 973–983.

Виссмен У. Введение в гидрологию. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 470 с.

Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis // *Journal of Hydrology*. 1995. Vol. 165. P. 349–370.

Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods // *J. Hydrol.* 2008. Vol. 352 (1–2), P. 168–173.

Price K. Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, and Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions. A Review // *Progress in Physical Geography*. 2011. Vol. 35 (4). P. 465–492.

Liu X.Y., Xie F.F. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang river basin based on digital filtering method // *Water Resour. Prot.* 2017. Vol. 33 (01). P. 18–23.

Таким образом, оптимальный диапазон значений α для методов выделения базисного стока Chapman, CM, Eckhardt ($BFI_{max} = 0,2$), Eckhardt ($BFI_{max} = 0,8$) и LH составляет от 0,77 до 0,95.

References

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, P. 769–784.

Baryshnikov N.B. *Antropogennoye vozdeystvie na samoreguliruyushchuyusya sistemu basseyn rechnoy potok – ruslo [Anthropogenic impact on the self-regulating system of the river basin flow – channel]*. SPb.: RGGMU, 1999, 218 p.

Dubinina V.G., Zhukova S.V. Otsenka vozmozhnykh posledstviy stroitel'stva Bagaevskogo gidrouzla dlya ekosistemy Nizhnego Dona [The assessment of potential consequences of the construction of the Bagaevsky hydroelectric complex for the Lower Don ecosystem], *Rybnoe khozyaystvo [Fisheries]*, 2016, vol. 4, p. 20–30.

Dubinina V.G., Nikitina O.I. Ob uchete ekologicheskogo faktora pri upravlenii vodnymi resursami vodokhranilishch [On the consideration of ecological factors in the management of water resources of reservoirs] *Vodokhranilishcha Rossiyskoy Federatsii: sovremennye ekologicheskie problemy, sostoyanie, upravlenie: sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konf., g. Sochi [Reservoirs of the Russian Federation: contemporary ecological problems, condition, management: collection of materials from the All-Russian scientific and practical conf., Sochi.]*, 23–29 sentyabrya 2019 g, Novocherkassk: Lik, 2019, p. 80–86.

Nikitina O.I. *Vliyanie regulirovaniya stoka na vodnye ekosistemy basseyna amura i меры по их sokhraneniyu [The impact of flow regulation on the aquatic ecosystems of the Amur River basin and measures for their conservation]*: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.36, Institut vodnykh problem rossiyskoy akademii nauk, Moskva, 2021, 147 p.

Hall F.R. Base-flow recessions – A review. *Water Resour. Res.* 1968, vol.4 (5), p. 973–983.

Vissmen U. *Vvedenie v gidrologiyu [Introduction to Hydrology]*, Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979, 470 p.

Tallaksen L.M. A review of baseflow recession analysis. *J. Hydrol.* 1995, vol.165, p. 349–370.

Eckhardt K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. *J. Hydrol.*, 2008, vol. 352 (1–2), p. 168–173.

- Liu Z, Liu S.Y., Ye J.P., Sheng F. et al. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China // *Forests*. 2019. Vol. 10. 1065.
- Sloto R. A., Crouse M. Y. HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis (96-4040). Reston, VA: U.S. Geological Survey. 1996.
- Arnold J.G., Allen P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records // *J. Am. Water Resour. Assoc.* 1999. Vol. 35 (2). P. 411–424.
- Aksoy H., Kurt I., Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method // *J. Hydrol.* 2009. Vol. 372 (1–4). P. 94–101.
- Zhang J., Zhang Y., Song J., Cheng L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia // *J. Hydrol.* 2017. Vol. 549. P. 252–263.
- Gnann S.J., Woods R.A., Howden N.J.K. Is there a baseflow Budyko Curve? // *Water Resour. Res.* 2019. Vol. 55 (4). P. 2838–2855.
- Chapman T. G. Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon // *Water Resour. Res.* 1991. Vol. 27 (7). P. 1783–1784.
- Chapman T.G., Maxwell A.I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. Paper presented at Hydrology and Water Resources Symposium Water and the Environment. Institution of Engineers, Australia, 1996.
- Eckhardt K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation // *Hydrol. Process.* 2005. 19 (2). P. 507–515.
- Yang H., Choi H. T., Lim H. Applicability assessment of estimation methods for baseflow recession constants in small forest catchments // *Water*. 2018. T. 10. №. 8. C. 1074.
- He S. et al. Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two-parameter recursive digital filter // *Hydrological Processes*. 2022. T. 36. №. 3. C. e14512.
- 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, № 1. С. 85–95. DOI 10.35634/2412-9518-2024-34-1-85-95.
- Гареев А.М. Водные ресурсы Башкирии и их состояние. Уфа: Китап. 1978. 182 с.
- Гареев А.М. Оптимальное планирование водоохранных мероприятий. Уфа: Китап. 1989. 230 с.
- Price K. Effects of Watershed Topography, Soils, Land Use, and Climate on Baseflow Hydrology in Humid Regions. A Review. *Progress in Physical Geography*, 2011, vol. 35 (4), p. 465–492.
- Liu XY, Xie FF. Spatial-temporal differentiation of base flow in Nujiang river basin based on digital filtering method. *Water Resour. Prot.*, 2017, vol. 33(01), p. 18–23.
- Liu Z., Liu S.Y., Ye J.P., Sheng F. et al. Application of a digital filter method to separate baseflow in the small watershed of Pengchongjian in Southern China. *Forests*, 2019, vol.10, 1065.
- Sloto R. A., Crouse M. Y. HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis (96-4040). Reston, VA: U.S. Geological Survey, 1996.
- Arnold, J.G., Allen, P.M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 1999, vol. 35 (2), p. 411–424.
- Aksoy, H., Kurt, I., Eris, E. Filtered smoothed minima baseflow separation method. *J. Hydrol*, 2009, vol. 372 (1–4), p. 94–101.
- Zhang, J., Zhang, Y., Song, J., Cheng, L. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. *J. Hydrol*, 2017. 549, p. 252–263.
- Gnann, S.J., Woods, R.A., Howden, N.J.K. Is there a baseflow Budyko Curve? *Water Resour. Res.*, 2019, vol. 55 (4), p. 2838–2855.
- Chapman T. G. Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Res.*, 1991, vol. 27 (7), p. 1783–1784.
- Chapman, T.G., Maxwell, A.I. Baseflow separation-comparison of numerical methods with tracer experiments. *Hydrology and Water Resources Symposium Water and the Environment*. Institution of Engineers, Australia, 1996.
- Eckhardt, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process*, 2005, vol. 19 (2), p. 507–515.
- Yang H., Choi H. T., Lim H. Applicability assessment of estimation methods for baseflow recession constants in small forest catchments. *Water*, 2018, vol. 10 (8), p. 1074.
- He S. et al. Impacts of parameter uncertainty on baseflow separation by a two-parameter recursive digital filter. *Hydrological Processes*, 2022, vol. 36(3), e14512.
- Hasanov I. A., Elizarev A.N., Tarakanov D.A. Ocenka effektivnosti metodov vydeleniya bazisnogo stoka dlya bassejna reki Beloj, Rossiya [Assessment of the effectiveness of baseflow separation methods for the Belaya River basin, Russia]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle*

- Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling // Institute of engineers Australia national conference. Barton, Australia: Institute of Engineers Australia, 1979. T. 79. Vol. 10. P. 89–93.
- Nathan R.J., McMahon T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses // Water Resour. Res. 1990. Vol. 26 (7). P. 1465–1473.
- 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. Vol. 35(2), P. 291–304.
- Brodie R. S., Hostetler S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs // Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conference. Auckland: New Zealand Hydrological Society Press. 2005. Vol. 28.
- Rimmer A., Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models // J. Hydrol. 2014. Vol. 514, P. 249–257.
- Сучкова К.В. Моделирование генетических составляющих речного стока на водосборе Можайского водохранилища: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.27. - Институт водных проблем российской академии наук, Москва, 2021. 157 с.
- 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. Vol. 23 (10). P. 4323–4331.
- Xie J., Liu X., Wang K., Yang T. et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. J. Hydrol, 2020. Vol. 583, 124628.
- Бориц С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. С. 176–189.
- Gan R., Xu M., Yang F. et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China. // Environ Earth Sci. 2022. Vol. 81. P.323.
- Narimani R., Jun C., Nezhad S.M., Bateni S.M., et al. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran // J. Hydrol, 2023. Vol. 47. 101383.
- Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future // Multimedia tools and applications. 2021. Vol. 80. P. 8091–8126.
- [Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences], 2024, vol. 34(1), pp. 85–95, DOI 10.35634/2412-9518-2024-34-1-85-95.
- Gareev A.M. *Vodnye resursy Bashkirii i ikh sostoyanie [Water Resources of Bashkiria and Their Condition.]*. Ufa: Kitap, 1978, 182 p.
- Gareev A.M. *Optimal'noe planirovanie vodookhrannykh meropriyatiy [Optimal Planning of Water Protection Measures.]*, Ufa: Kitap, 1989, 230 p.
- Lyne V., Hollick M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Inst. of eng. Australia national conf.* Australia, Barton 1979, vol. 79 (10), p. 89–93.
- Nathan, R.J., McMahon, T.A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour. Res.*, 1990, vol. 26 (7), p. 1465–1473.
- 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, vol. 5(2), p. 291–304.
- Brodie R. S., Hostetler S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. *Proc. of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 conf.* Auckland: New Zealand Hydrological Society Press, 2005, vol. 28.
- Rimmer A., Hartmann A. Optimal hydrograph separation filter to evaluate transport routines of hydrological models. *J. Hydrol*, 2014, vol. 514, p. 249–257.
- Suchkova K.V. *Modelirovanie geneticheskikh sostavlyayushchikh rechnogo stoka na vodosbore Mozhayskogo vodokhranilishcha [Modeling the Genetic Components of River Flow in the Mozhayskoye Reservoir Watershed.]*: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.27, Institut vodnykh problem rossiyskoy akademii nauk, Moskva, 2021, 157 p.
- 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, vol. 23 (10), p. 4323–4331.
- Xie J., Liu X., Wang K., Yang T., et al. Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States. *J. Hydrol*, 2020, p.583, 124628.
- Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. *Effektivnost' modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka [Effectiveness of Modeling and Forecasting River Flow]. Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasts]*, 2020, p. 176–189.
- Gan R., Xu M., Yang F. et al. The assessment of baseflow separation method and baseflow characteristics in the Yiluo River basin, China. *Environ Earth Sci*, 2022, vol. 81, p. 323.

Narimani R., Jun C., Nezhad S.M., Bateni S.M., et al. The role of climate conditions and groundwater on baseflow separation in Urmia Lake Basin, Iran. *J. Hydrol*, 2023, vol. 47, 101383.

Katoch S., Chauhan S. S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future // *Multimedia tools and applications*, 2021, vol. 80, pp. 8091–8126.