

Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 103—119.

Hydrometeorology and Ecology. 2026;(82):103—119.

Научная статья

УДК 556.167.048(282.247.415)

doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-103-119

Расчет минимального летне-осеннего стока рек бассейна Камы при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в современных условиях

*Владимир Михайлович Сакович¹, Александр Владимирович Сикан¹,
Ангелина Андреевна Железная²*

¹ Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, sakovich@rshu.ru

² Независимый исследователь

Аннотация. На примере рек бассейна р. Камы показана методика расчета минимального летне-осеннего стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в условиях меняющегося климата и возрастающей антропогенной нагрузки на речные водосборы. В качестве базовой формулы использована формула А. М. Владимирова с новыми районными параметрами. Районирование территории выполнено с применением методов кластерного анализа. Показано, что использование данных за современный климатический период позволяет существенно повысить точность расчета.

Ключевые слова: Бассейн реки Камы, изменение климата, летне-осенняя межень, минимальные расходы воды.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы кафедры инженерной гидрологии РГТМУ «Совершенствование методов расчета основных режимных характеристик рек и водоемов с учетом изменений климата и возрастающей антропогенной нагрузки на водосборы водных объектов».

Для цитирования: Сакович В. М., Сикан А. В., Железная А. А. Расчет минимального летне-осеннего стока рек бассейна Камы при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений в современных условиях // Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 103—119. doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-103-119.

Original article

Calculation of the minimum summer-autumn river flow in the Kama basin in the absence of hydrometric observations in modern conditions

Vladimir M. Sakovich¹, Alexander V. Sikan¹, Angelina A. Zheleznaya²

¹ Russian State Hydrometeorological University

² Independent researcher

Summary. A method for estimating the minimum river flow in the absence of observation data is considered. The calculation method reflecting current climatic conditions and anthropogenic impact is shown

for the rivers of the Kama basin. Data on the minimum summer-autumn runoff of 120 rivers were used. Catchment areas vary from 10 to 20,000 km². Minimum 30-day water discharge with a probability of exceeding 80 % is the main dimension characteristic. It is shown that to calculate the flow of small rivers with a catchment area of less than 2500 km², it is possible to use regional dependencies of the minimum flow rate on the catchment area. New district boundaries and new values for the parameters of the calculation equations have been determined.

The cluster analysis method was used to divide the territory into zones. To identify homogeneous zones, the following features were used: geographic latitude and longitude of the catchment center; minimum 30-day water discharge in second per unit square with a probability of exceeding 80 %; average height of the river catchment. The cluster analysis method made it possible to obtain an optimal combination of the number of zones and the accuracy of the calculation equations. The number of districts has been reduced by half, from 11 to 5, compared to the previous method. For the rivers of the Kama basin as a whole, the average calculation error decreased from 38 % to 25 %. The new method does not have the systematic underestimation of calculated runoff values that the previous method had (–11 % on average).

In case of significant spatial heterogeneity of the conditions of runoff formation the calculation of the minimum runoff of medium-sized rivers should be done using the spatial interpolation method. For this purpose, the closest analogous rivers are used. The coefficients of transition from minimum runoff with probability of exceeding 80 % to a runoff with another probability of exceeding are determined within the boundaries of the new districts.

Keywords: The Kama River basin, climate change, summer-autumn runoff, minimum water discharge.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the research topic of the Department of Engineering Hydrology of the Russian State Hydrometeorological University: «Improving the methods for calculating the main regime characteristics of rivers and reservoirs, taking into account climate change and increasing anthropogenic load on the catchment areas of water bodies.»

For citation: Sakovich V., Sikan A., Zheleznaya A. Calculation of the minimum summer-autumn river flow in the Kama basin in the absence of hydrometric observations in modern conditions *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2026;(82):(103—119). doi: 10.33933/2713-3001-2026-82-103-119. (In Russ.).

Введение

Сток рек в маловодные периоды года является одной из основных расчетных гидрологических характеристик, необходимых в строительной, гидротехнической, водохозяйственной и водоохранной практике. В результате изменения климата минимальный сток рек России изменился. По данным ГГИ, на большей части страны наблюдается повышение минимального летне-осеннего стока. Наиболее значительные изменения отмечаются на равнинных реках юга ЕТР, где минимальный летне-осенний сток повысился на 50—100 % [1]. В этой ситуации требуется корректировка и совершенствование методов расчета минимального стока с учетом данных наблюдений за последний климатический период.

В соответствии с требованиями СП 529.1325800.2023 минимальные расходы воды на реках при отсутствии данных гидрометрических наблюдений определяются по методике А. М. Владимирова [2]. Для средних рек минимальные 30-суточные модули стока 80 %-ной обеспеченности ($q_{30,80\%}$) определяются по картам изолиний или методом пространственной интерполяции. Для малых рек минимальные 30-суточные расходы воды 80 %-ной обеспеченности ($Q_{30,80\%}$) рассчитываются по формулам в зависимости от площади водосбора или средней высоты водосбора. Для выполнения таких расчетов в СНиП 2.01.14–83 были представлены карты и таблицы параметров расчетных формул для всей территории России.

Однако в настоящее время эти таблицы и карты отменены как устаревшие и требуется их обновление с учетом данных наблюдений за последние годы.

Цель настоящего исследования: разработать методику расчета минимального летне-осеннего стока для рек бассейна Камы при отсутствии данных гидрометрических наблюдений с учетом произошедших климатических и антропогенных изменений.

Общая характеристика района исследований

Бассейн реки Камы включает: Пермский край; Республики Башкортостан, Удмуртию, Татарстан и Марий-Эл; западную часть Свердловской области, северо-западную территорию Челябинской области, восточную часть Кировской области, а также незначительные участки Республики Коми, Оренбургской и Нижегородской областей.

Камский бассейн расположен в пределах двух природных территорий: Русской равнины и Уральских гор [3]. Равнинная часть бассейна расположена в пределах лесной, лесостепной и частично степной физико-географических областей;

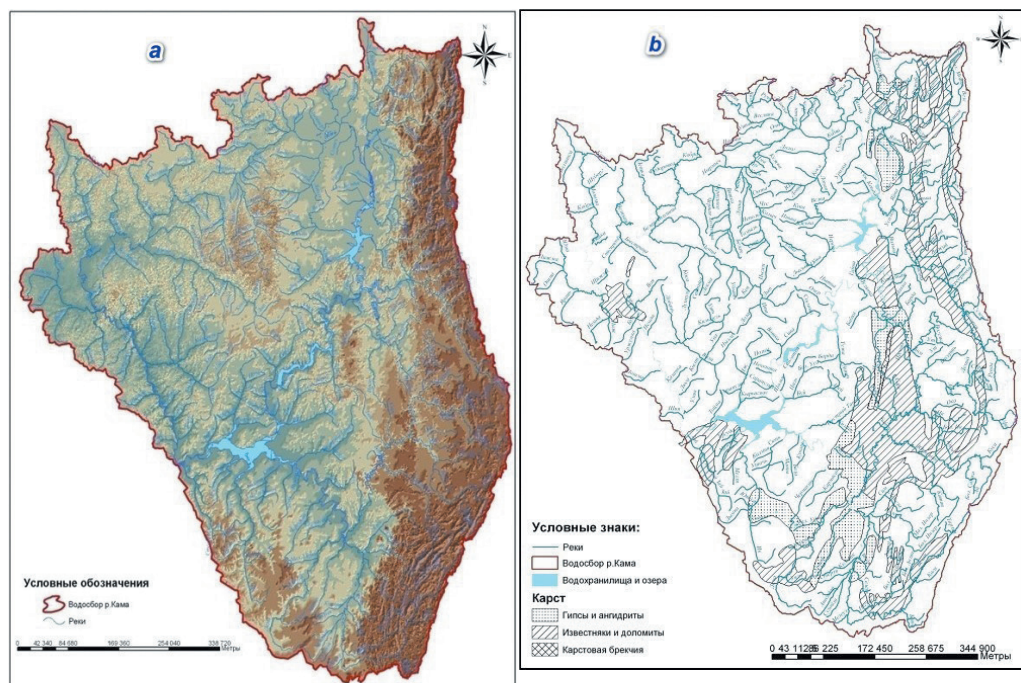


Рис.1. Карта рельефа бассейна реки Камы (а) и схема распространения карстующихся пород (б) (источник: SKIOVO Камского БВУ [3]).

Fig.1. Relief map of the Kama River basin (a) and the distribution scheme of karst rocks (b) (source: SKIOVO of the Kama River Basin [3]).

горная — в пределах западных склонов горных природных областей: Северо-Уральской, Средне-Уральской и Южно-Уральской (рис. 1 *a*). Уральские горы в пределах Камского бассейна характеризуются преимущественно небольшой высотой (400—600 м) и мягкими очертаниями. И только отдельные участки имеют высоту более 1000 м. Характерное явление для западного склона Урала — карст, развивающийся в осадочных породах (известняки, доломиты, гипсы) (рис. 1 *b*). Под влиянием карста сток многих малых рек снижается по отношению к зональному и может даже прекращаться в период межени. В то же время из-за несовпадения границ поверхностных и подземных водоразделов нередки случаи, когда сток превышает зональное значение [3, 4].

Район исследований (особенно его центральная и южная часть) отличается высоким уровнем промышленно-хозяйственно-бытового развития, сложившимся в первой четверти XXI века. Антропогенные факторы могут оказывать разнонаправленное влияние на водный режим рек в целом и на минимальный — стока, в частности.

Климат в бассейне р. Камы — умеренно континентальный. Годовая амплитуда температур воздуха составляет 30—35 °С, возрастая к востоку до 37—40 °С. Теплый период продолжается 7 месяцев — с апреля по октябрь. Максимум температуры наблюдается в июле, минимум — в январе. В бассейне р. Камы выпадает 500—800 мм осадков, на крайнем северо-востоке — до 1000 мм. На холодный период года приходится 30—35 % осадков, на теплый — 65—70 %.

Закономерности сезонных изменений температуры и осадков иллюстрируют диаграммы среднемесячных температур воздуха и месячных сумм осадков на метеостанции г. Пермь (рис. 2).

При анализе климатических изменений в бассейне р. Камы использовались ряды из электронной базы данных «Специализированные массивы для климатических исследований» [5] — данные о приземной температуре за период с 1936 г. по 2024 г., данные по осадкам — за период с 1936 г. по 2015 г.

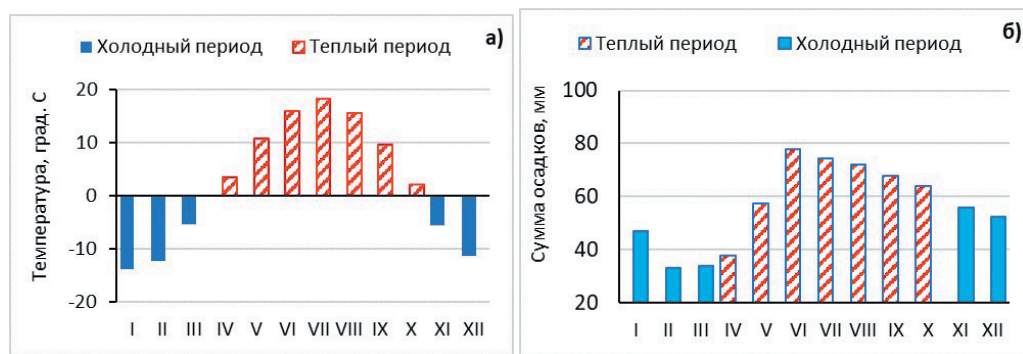


Рис. 2. Средние многолетние среднемесячные температуры воздуха (*a*) и суммы месячных осадков (*b*); МС Пермь, за периоды с 1936 г. по 2024 г. (*a*) и с 1936 г. по 2015 г. (*b*).

Fig. 2. Average long-term average monthly air temperatures (*a*) and monthly precipitation amounts (*b*); MS Perm, for the periods 1936—2024 (*a*) and 1936—2015 (*b*).

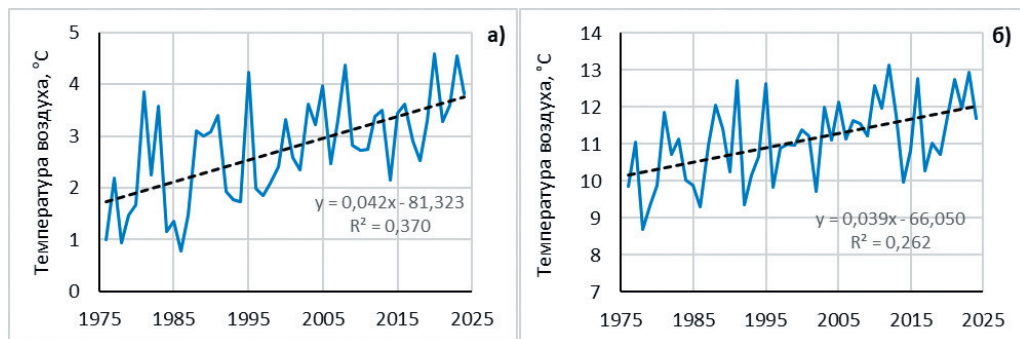


Рис. 3. Хронологические графики среднегодовой температуры воздуха (а) и средней температуры за теплый период года (б); МС Пермь.

Fig. 3. Chronological graphs of the average annual air temperature (a) and the average temperature for the warm period of the year (b); MS Perm.

По данным «Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год» [6], на всей территории России в рядах температуры приземного воздуха, осредненной за год и по сезонам, начиная с 1976 г., прослеживается тренд на повышение, поэтому при анализе особенностей климата в бассейне р. Кама оценка значимости трендов в рядах метеорологических характеристик также проводилась за период с 1976 г.

На рис. 3 представлены хронологические графики среднегодовой температуры воздуха и средней температуры за теплый период года по метеорологической станции г. Пермь. Оба ряда имеют значимый тренд на повышение. При оценке трендов использовался критерий значимости коэффициента регрессии [7] при уровне значимости $2\alpha = 5\%$.

Величина тренда у ряда среднегодовой температуры воздуха составила $0,42\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Величина тренда у ряда средних температур за теплый период немного ниже: $0,39\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет.

В рядах годовых сумм осадков и сумм осадков за теплый период года значимые тренды отсутствуют (рис. 4), но на равнинной части бассейна небольшое увеличение осадков наблюдается. За современный климатический период (1986—2015 гг.) по сравнению с предшествующим тридцатилетним периодом (1956—1985 гг.) суммы годовых осадков и осадков за теплый период года увеличились на 5—7%.

По характеру водного режима реки бассейна р. Камы относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и длительной устойчивой зимней меженью (восточно-европейский тип).

Доля талых вод в суммарном стоке рек меняется по территории: от 60—65% в средней и северной частях территории, а также в пределах наиболее возвышенных частей горного Урала до 80—90% в южных лесостепных районах. В горной

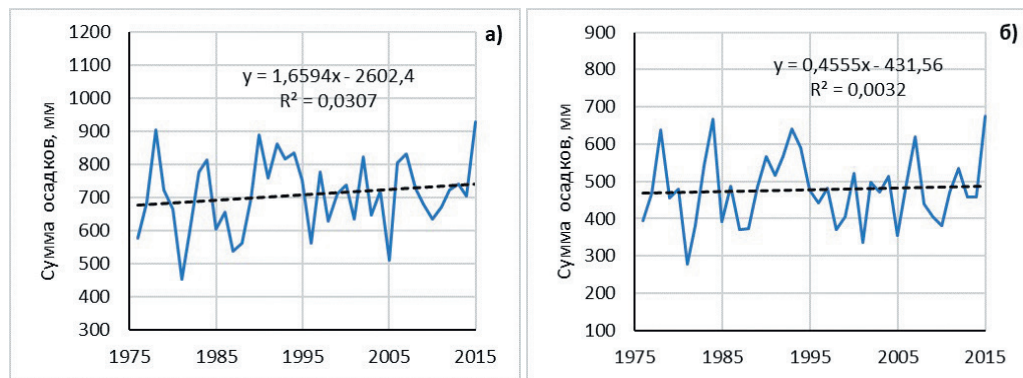


Рис. 4. Хронологические графики годовых сумм осадков (а) и сумм осадков за теплый период года (б); МС Пермь.

Fig. 4. Chronological graphs of annual precipitation amounts (a) and precipitation amounts for the warm period of the year (b); MS Perm.

части наряду с твердыми осадками в питании рек увеличивается роль дождей. Подземный сток составляет в среднем на территории бассейна от 20 до 30 % годового стока. Наибольшая величина подземной составляющей стока у карстовых водотоков, а также у рек, бассейны которых с поверхности сложены песчаными грунтами.

Летне-осенняя межень обычно наступает в середине июня и заканчивается в октябре. Средняя продолжительность межени изменяется от 140—150 дней в лесостепных районах до 60—70 дней на севере равнинной территории и в горах. В бассейне р. Камы сток за период летне-осенней межени превышает сток зимней межени в среднем в 1,5 раза. Наиболее маловодными реки обычно бывают в августе, но иногда в июне-июле или в сентябре-октябре. На малых карстовых водотоках ($F < 100 \text{ км}^2$) сток в летне-осенний сезон может прекращаться из-за больших потерь на фильтрацию как на водосборе, так и в русле.

Наблюдаемое в настоящее время потепление климата проявилось в изменении годового и минимального стока рек исследуемого региона [8, 9]. Повышение температуры воздуха в зимний период привело к увеличению числа оттепелей и повышению базисного стока к началу летней межени. Учитывая, что осадки за летне-осенний период тоже увеличились, сток за летнюю межень увеличился.

По данным ГГИ [1], в результате изменений климата минимальный летне-осенний сток на реках различных частей ЕТР, в том числе в бассейне р. Камы, за период с 1979 г. по 2018 г. по сравнению с предшествующим периодом с 1950 г. по 1978 г. увеличился на 10—50 %. О подобных изменениях говорится и в ряде других публикаций [10—13].

Материалы и методы

В настоящей работе для анализа использовались данные о минимальных 30-суточных летне-осенних расходах воды по 120 постам, расположенным

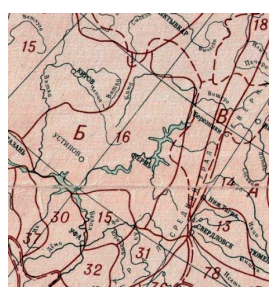
в бассейне р. Камы. Диапазон площадей водосборов: от 10 км² до 20 000 км². Диапазон средних высот водосборов: от 126 до 934 м БС. Расчетные расходы обеспеченностью 50, 75, 80, 90, 95 и 98 % были получены из научно-прикладного справочника «Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы», представленного на сайте ГГИ [14].

В соответствии с рекомендациями А. М. Владимирова [2] на территории камского бассейна граница между малыми и средними реками по площади водосбора для летне-осеннего минимального стока установлена равной 1500 км² для равнинной части (район Б) и 2000 км² — для горной части (район В) (табл. 1).

Таблица 1

Карта районов и таблица из СНиП 2.01.14–83 для определения границы между средними и малыми реками

The map of the districts and a table from SNIP 2.01.14–83 for determining the boundary between medium and small rivers

	Наибольшие площади водосборов малых рек (км ²) для бассейна реки Камы		
	Буквенный индекс района	Летне-осенний период	Зимний период
Б	1500	1500	
В	2000	1800	

Для малых равнинных рек минимальный 30-суточный расход 80 %-ной обеспеченности ($Q_{30,80\%}$) определяется по формуле:

$$Q_{30,80\%} = 10^{-3} a(F + f_0)^n, \quad (1)$$

где F — площадь водосбора, км²; a, f_0, n — эмпирические параметры, зависящие от района (табл. 2).

В СНиП 2.01.14–83 на рассматриваемой территории было выделено 11 районов (табл. 2, рис. 5).

Таблица 2

Параметры a, n, f_0 в формуле для расчета минимального 30-суточного расхода воды вероятностью превышения 80 % на малых реках бассейна р. Камы (по СНиП 2.01.14–83)

Parameters a, n, f_0 in the formula for calculating the minimum 30-day water discharge with a probability of exceeding 80 % in small rivers of the Kama River basin (according to SNIP 2.01.14–83)

Номер района	Летне-осенний период		
	a	n	f_0
15	1,84	0,98	0
16	0,022	1,53	0

Номер района	Летне-осенний период		
	a	n	f_0
17	0,026	1,63	0
18	0,40*	1,30	0
30	0,40	1,08	0
31	0,75	1,10	0
32	0,22	1,00	0
33	0,18	1,27	0
36	0,40	1,05	-100
37	5,25	0,81	0

* — исправлена опечатка в СНиП 2.01.14–83

По данным табл. 2, были построены совмещенные аналитические зависимости расхода $Q_{30,80\%}$ от площади водосбора (формула 1) для всех 11 районов. Анализ графиков показал:

— в СНиП 2.01.14–83 есть опечатка — дан неверный коэффициент $a = 0,0004$ по району 18 (правильное значение: $a = 0,4$);

— для бассейна р. Камы в целом выделено избыточное количество районов (11). При этом для некоторых районов оценка параметров формулы (1) была

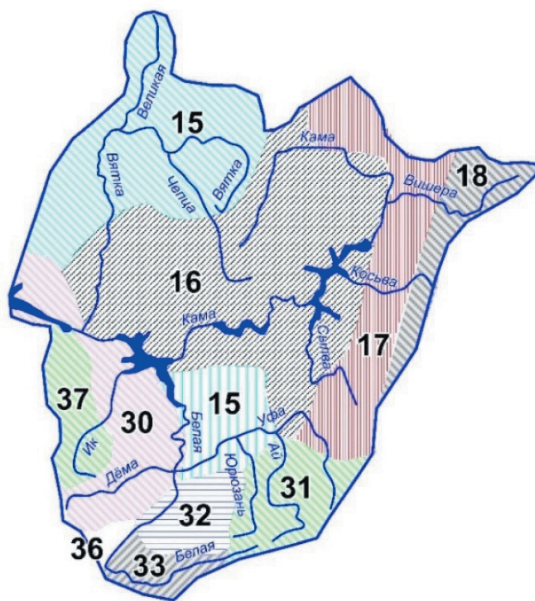


Рис. 5. Районы для определения параметров формулы (1) по СНиП 2.01.14–83.

Fig. 5. Areas for determining the parameters of formula (1) according to SNIP 2.01.14–83.

выполнена при числе гидрологических постов менее 6, что противоречит требованиям действующих в настоящее время нормативных документов.

Учитывая сказанное, было принято решение рассмотреть варианты районирования с тремя, четырьмя, пятью и шестью районами. Районирование выполнялось с использованием кластерного анализа.

Результаты исследования

В настоящей работе для выделения однородных районов по условиям формирования минимального стока применялся метод k -средних. В качестве признаков использовались:

- географическая широта центра тяжести водосбора;
- географическая долгота центра тяжести водосбора;
- минимальный 30-суточный модуль стока 80 %-ной обеспеченности;
- средняя высота водосбора.

Расчет выполнялся в программе STATISTICA. Использовались посты с площадью водосбора до 2500 км², т. е. всего 66 постов. В результате исходная матрица имела размер 66×4.

В кластерном анализе разбиение на кластеры существенно зависит от абсолютных значений исходных данных, поэтому перед кластеризацией ряды признаков нормировались с использованием преобразования:

$$\tilde{x}_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad (2)$$

где $x_{i,j}$ — i -тое значение j -того признака; \bar{x}_j — среднее значение j -того признака; σ_j — среднеквадратическое отклонение j -того признака.

Рассматривались варианты с разбиением всего массива данных на 3, 4, 5 и 6 кластеров. При выборе числа кластеров учитывалось не только качество кластеризации, но и требование к надежности получаемых районных зависимостей. В качестве расчетного принято минимальное число кластеров, при котором выполнялись следующие ограничения:

$$Z = \frac{L_{\text{BK}}}{L_{\text{МК}}} < 0,5; R^2 > 0,5; K_{\text{min}} \geq 6, \quad (3)$$

где Z — критерий качества кластеризации; R^2 — минимальный коэффициент детерминации при построении районных зависимостей $q_{30,80\%} = f(F)$; K_{min} — минимальное число точек в одном кластере (табл. 3).

Метрика Z — одна из разновидностей индекса Дэвиса-Болдина (Davies–Bouldin Index) [15], представляющая собой отношение среднего внутрикластерного евклидова расстояния до центров кластеров (L_{BK}) к среднему межклассовому евклидову расстоянию между центрами кластеров ($L_{\text{МК}}$). Чем меньше значение Z , тем выше качество кластеризации. Однако выбор оптимального числа классов остается за исследователем.

Условия $R^2 > 0,5$ и $K_{\min} \geq 6$, дополнительно используются в соответствии с требованиями СП 529.1325800.2023 и обеспечивают надежность получаемых районных зависимостей (табл. 3).

Таблица 3

Критерии для выбора оптимального числа кластеров
Criteria for choosing the optimal number of clusters

Число кластеров	Среднее евклидово расстояние		Z	K_{\min}	R^2
	$L_{\text{мк}}$	$L_{\text{вк}}$			
2	1,26	0,70	0,56	32	< 0,5
3	1,25	0,60	0,48	19	< 0,5
4	1,28	0,54	0,43	11	< 0,5
5	1,27	0,52	0,41	8	> 0,5
6	1,31	0,43	0,33	6	> 0,5

Как видно из таблицы, минимальное число кластеров, при котором выполняются условия (3) равно пяти. На рис. 6 представлен график средних значений нормированных признаков для каждого кластера.

Средние районные значения модуля минимального стока 80 %-ной обеспеченности и средней высоты водосбора по результатам кластеризации даны в табл. 4. Отметим, что наибольшие минимальные модули стока наблюдаются в первом районе, наименьшие — в пятом.

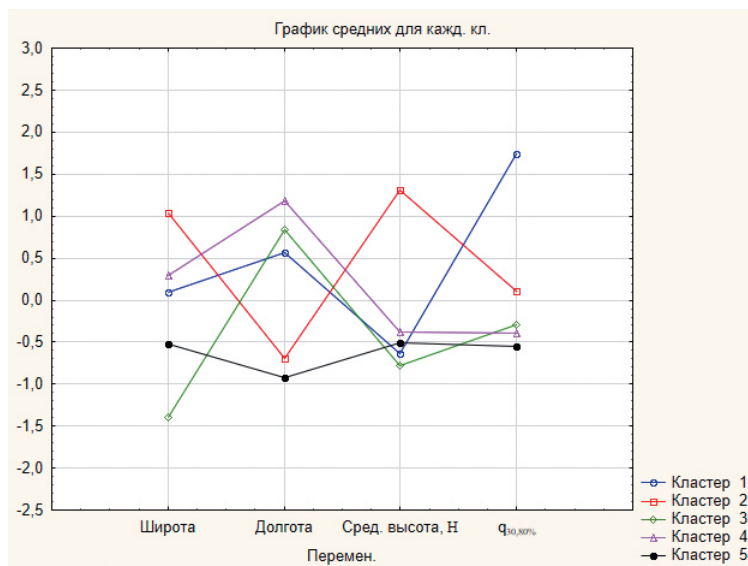


Рис. 6. График средних значений признаков для каждого кластера.

Fig. 6. Graph of average values of features for each cluster.

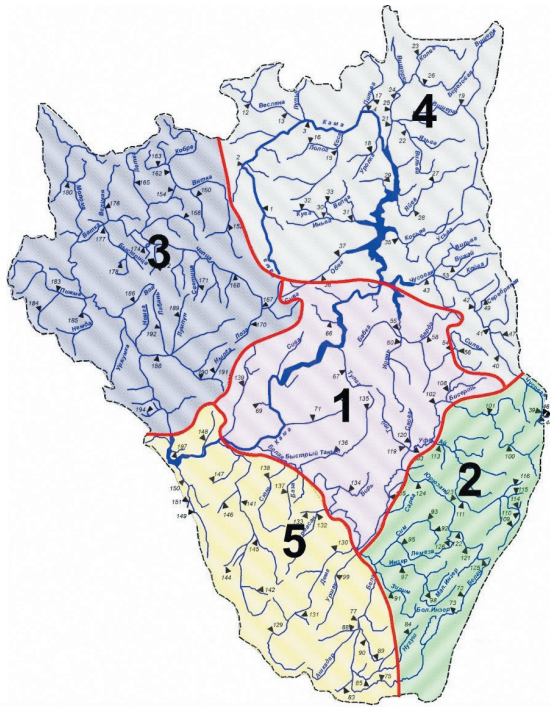


Рис. 7. Районирование территории бассейна р. Камы по условиям формирования минимального летне-осеннего стока.

Fig. 7. Zoning of the territory of the Kama River basin according to the conditions of formation of the minimum summer-autumn runoff.

Схема районирования территории камского бассейна при пяти кластерах показана на рис. 7.

Таблица 4

Средние районные значения средней высоты водосбора и модуля минимального стока
The average regional values of the average catchment height and minimum flow modulus

Номер кластера (района)	Средняя высота водосбора, H м	Минимальный летне-осенний модуль стока, $q_{30,80\%}$, л/с км ²
1	215	3,57
2	610	1,86
3	184	1,43
4	268	1,33
5	239	1,17

Для оценки параметров формулы (1) a и n для каждого района были построены зависимости $Q_{30,80\%} \cdot 10^3 = f(F + f_0)$. Параметр f_0 находился методом последовательных приближений. Графики полученных зависимостей представлены на рис. 8.

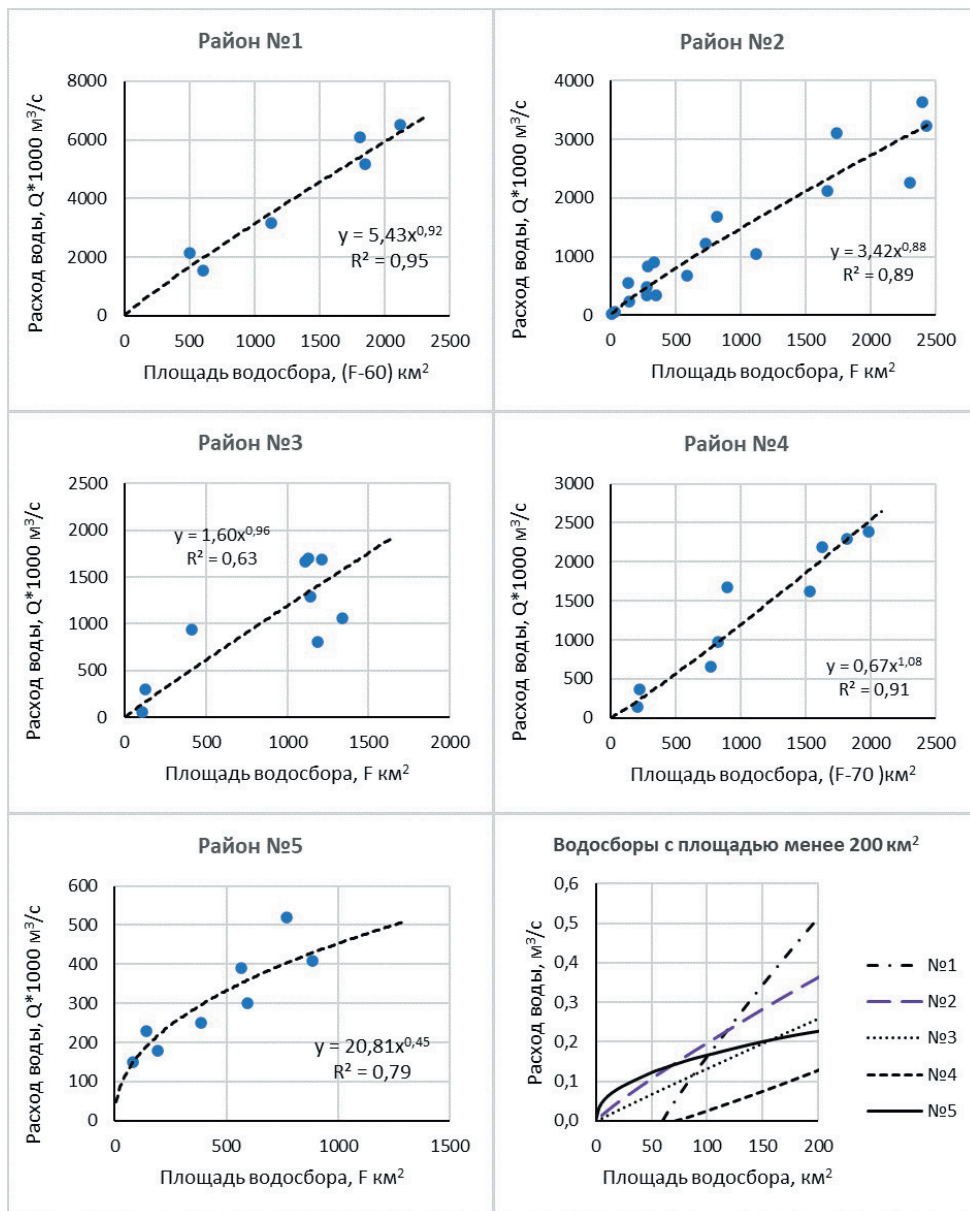


Рис. 8. Графики зависимостей минимальных 30-суточных летне-осенних расходов воды 80 %-ной обеспеченности от площади водосбора для районов 1—5 и график полученных аналитических зависимостей для малых площадей водосбора (менее 200 км²).

Fig. 8. Graphs of the dependencies of the minimum 30-day summer-autumn flow rates with a probability exceeding 80 % on the catchment area for districts 1—5 and a graph of the obtained analytical dependencies for small catchment areas (less than 200 km²).

Для всех зависимостей коэффициент детерминации удовлетворяет условию $R^2 > 0,5$ и меняется от $R^2 = 0,63$ (район 3) до $R^2 = 0,95$ (район 1). Параметры расчетной формулы приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры a, n, f_0 в формуле для расчета минимальных 30-суточных летне-осенних расходов воды вероятностью превышения 80 % на малых реках бассейна р. Камы (по результатам исследования)

Parameters a, n, f_0 in the formula for calculating the minimum 30-day summer-autumn water flow rates with a probability of exceeding 80 % in small rivers of the Kama River basin (according to the results of the study)

№ района	Название	Параметры формулы			Наибольшие площади водосборов малых рек, км ²
		a	n	f_0	
1	Центральный	5,43	0,92	-60	2500
2	Юго-восточный	3,42	0,88	0	2500
3	Северо-западный	1,60	0,96	0	2000
4	Северо-восточный	0,67	1,08	-70	2000
5	Юго-западный	20,8	0,45	0	1500

Как видно из табл. 5, для районов 1 и 4 параметр f_0 не равен нулю и является отрицательным, т. е. на реках с площадью водосборов менее 60—70 км² в маловодные годы будет иметь место прекращение стока. Проверка показала, что средняя относительная ошибка расчета по формуле (1) с параметрами, представленными в табл. 4, колеблется по районам от 12 % (район 1) до 35 % (район 3) и в среднем для бассейна реки Камы составляет 25 %.

Было также проведено сравнение расчета по формуле (1) с использованием параметров, полученных в настоящем исследовании, и параметров, рекомендованных СНиП 2.01.14–83. Погрешность расчета (Δ) определялась по формуле: $\Delta = (Q_{\phi} - Q)$, где Q — значение минимального расхода, рассчитанное по ряду наблюдений; Q_{ϕ} — значение минимального расхода, рассчитанное по формуле (1). Относительная ошибка определялась по формуле: $\delta_{\%} = 100\Delta/Q$. Абсолютное значение относительной ошибки определялось как $|\delta|_{\%} = 100|\Delta|/Q$. Результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6

Относительные ошибки (%) расчета минимальных летне-осенних расходов воды по предложенной методике (М-25) и методике СНиП 2.01.14–83 для малых рек бассейна р. Камы

Relative errors (%) in calculating the minimum summer-autumn water consumption according to the proposed methodology (M-25) and the methodology of Building codes and regulations 2.01.14–83 for small rivers of the Kama basin

№ района	Название	Наибольшие ошибки		Средние относительные ошибки, %			
				С учетом знака, δ		Абсолютные, $ \delta $	
		СНиП-83	М-25	СНиП-83	М-25	СНиП-83	М-25
1	Центральный	-65	27	-33	10	39	12
2	Юго-восточный	-94	76	-26	7	49	29

№ района	Название	Наибольшие ошибки		Средние относительные ошибки, %			
				С учетом знака, δ		Абсолютные, $ \delta $	
		СНиП-83	М-25	СНиП-83	М-25	СНиП-83	М-25
3	Северо-западный	101	77	7	-1	39	35
4	Северо-восточный	75	53	7	2	20	24
5	Юго-западный	-63	23	-3	4	29	15
	Весь бассейн р. Камы			-11	4	38	25

Как видно из табл. 6, для районов 3 и 4 обе методики дают близкие ошибки. По районам 1, 2 и 5 расчет по предложенной методике дает ошибку на 14—27 % меньше. В целом по бассейну р. Камы средняя ошибка уменьшилась с 38 % до 25 % и отсутствует систематическое занижение, характерное для расчетов по СНиП-83 в районах 1 и 2, где занижение составляет -33 % и -26 %.

Для всех районов были рассчитаны коэффициенты $\lambda_{P\%}$ для перехода от расходов обеспеченностью $P = 80\%$ к расходам других обеспеченностей. Коэффициенты $\lambda_{P\%}$ рассчитывались для каждого поста по формуле:

$$\lambda_{P\%} = Q_{30,P\%} / Q_{30,80\%} \quad (4)$$

В качестве расчетных $\lambda_{P\%}$ принимались их средние районные значения. При этом использовались данные не только по малым, но и по средним рекам. Результаты расчетов представлены в табл. 7.

Таблица 7

Переходные коэффициенты $\lambda_{P\%}$
для определения минимальных 30-суточных расходов воды различной обеспеченности
Transition coefficients $\lambda_{P\%}$
for determining minimum 30-day water flow rates of varying probability of exceeding

№ района	Переходные коэффициенты $\lambda_{P\%}$				
	75	80	90	95	98
1	1,06	1,00	0,87	0,77	0,67
2	1,10	1,00	0,78	0,64	0,52
3	1,08	1,00	0,84	0,73	0,63
4	1,11	1,00	0,75	0,61	0,49
5	1,12	1,00	0,69	0,52	0,39

При разработке региональной методики расчета минимального летне-осеннего стока средних рек рассматривались два варианта: построение карты изолиний минимальных 30-суточных модулей стока 80 %-ной обеспеченности и метод пространственной интерполяции. Поскольку территория камского бассейна очень неоднородна по ландшафтным, климатическим и гидрологическим условиям, определять летне-осенние минимальные 30-суточные модули стока 80 %-ной обеспеченности средних рек целесообразно методом пространственной интерполяции по ближайшим рекам-аналогам со сходными условиями формирования стока. Этот метод оказался наиболее эффективным для данного региона.

Заключение

В настоящем исследовании на примере рек бассейна р. Камы показана методика расчета минимального летне-осеннего стока при отсутствии данных гидрометрических наблюдений в условиях меняющегося климата и возрастающей антропогенной нагрузки на речные водосборы. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для расчета минимального стока малых рек в качестве базовой формулы может использоваться формула А. М. Владимирова с уточненными границами районов и новыми районными параметрами.

2. При районировании территории возможно применение методов кластерного анализа. Использование кластерного анализа позволяет получить оптимальную детальность районирования с учетом средней погрешности расчетных районных зависимостей.

3. Для расчета минимального стока средних рек в случае существенной пространственной неоднородности условий формирования минимального стока наиболее эффективным является метод пространственной интерполяции по ближайшим рекам-аналогам со сходными условиями формирования стока.

4. Для перехода от расчетных минимальных летне-осенних расходов 80 %-ной обеспеченности к минимальным расходам другой обеспеченности следует определить средние районные коэффициенты λ_p с учетом данных наблюдений за последние годы и с учетом изменившихся границ однородных районов.

Список литературы

1. Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: Научно-прикладной справочник. СПб.: ООО «РИАЛ», 2021. 190 с.
2. Владимиров А. М. Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
3. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Кама. Книга 1. Общая характеристика речного бассейна. Камское БВУ, 2014. 370 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kambvu.ru/download/skiovo_basseina_r_kama.zip. (дата обращения 31.08.2025).
4. Урбанова О. Н., Горшкова А. Т., Бортникова Н. В. и др. Меженный сток малых рек Нижнекамского муниципального района Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 3(31). С. 78—86. doi: 10.24852/2411-7374.2022.3.79.87.
5. Специализированные массивы для климатических исследований. ВНИИГМИ-МЦД. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml>. (дата обращения 17.12.2025).
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025, 104 с.
7. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации: Том 2 Анализ временных рядов и случайных полей. СПб.: РГГМУ, 2020. — 196 с.
8. Сивохин Ж. Т., Павлейчик В. М., Падалко Ю. А. Изменение минимального стока в бассейне реки Урал // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85, № 6. С. 900—913. doi:10.31857/S2587556621060133.
9. Калинин В. Г., Чичагов В. В., Гырдымов Д. А. Многолетние колебания годового стока рек водосбора верхней и средней Камы // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2023. Т. 33, № 4. С. 456—466. doi: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-456-466.
10. Bolgov M. V., Korobkina E. A., Trubetskov M. D. et al. Present-day variations of the minimum runoff of the Volga basin rivers // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. Vol. 39, No. 3. P. 187—194. doi: 10.3103/S1068373914030078.

11. Болгов М. В., Трубецкова М. Д., Филимонова М. К., Филиппова И. А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне реки Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 3. С. 83—99. doi: 10.35567/1999-4508-2014-3-7.
12. Марков М. Л., Гуревич Е. В., Виноградов А. Ю. Минимальный сток рек Черноморского побережья России // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1, № 3. С. 408—425. doi: 10.34753/HS.2019.1.3.003.
13. Яковлев П. И. Некоторые особенности формирования минимального меженного и подземного стока рек в верхней части бассейна Западной Двины // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 5. С. 39—58. doi: 10.35567/1999-4508-2025-5-39-58.
14. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Камы: Научно-прикладной справочник / Под редакцией Георгиевского В. Ю.: Электронный ресурс. Текстовые и граф. данные в формате PDF (2 файла: 25 Мб).
15. Davis D. L., Bouldin D. V. A measure of cluster separation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1979. Vol. PAMI-1, No. 2, P. 224—227. doi: 10.1109/TPAMI.1979.4766909.

References

1. *Mnogoletniye kolebaniya i izmenchivost vodnykh resursov i osnovnykh kharakteristik stoka rek Rossiyskoy Federatsii: Nauchno-prikladnoy spravochnik = Long-term fluctuations and variability of water resources and main characteristics of river flow in the Russian Federation: Scientific and applied handbook*. Saint Petersburg: OOO “RIAL”, 2021: 190 p. (In Russ.).
2. Vladimirov A. M. *Stok rek v malovodnyy period goda = River flow during the low-water period of the year*. Leningrad: Hidrometeoizdat, 1976: 295 p. (In Russ.).
3. *Skhema kompleksnogo ispolzovaniya i okhrany vodnykh obyektov basseyna reki Kama. Kniga 1. Obshchaya kharakteristika rechnogo basseyna = Scheme for the integrated use and protection of water bodies in the Kama River basin. Book 1. General characteristics of the river basin*. Kamskoye BVU, 2014: 370 p. Available at: https://kambvu.ru/download/skiovo_basseina_r_kama.zip/ (accessed on: 31.08.2025). (In Russ.).
4. Urbanova O. N., Gorshkova A. T., Bortnikova N. V. et al. Low-water flow of small rivers in the Nizhnekamsk municipal district of the Republic of Tatarstan. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii = Russian Journal of Applied Ecology*. 2022; 3(31): (78—86). doi: 10.24852/2411-7374.2022.3.79.87. (In Russ.).
5. *Spetsializirovannyye massivy dlya klimaticheskikh issledovaniy = Specialized data sets for climate research*. VNIIGMI-MCD. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml>. (accessed on: 17.12.2025). (In Russ.).
6. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiyskoy Federatsii za 2024 god = A report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2024*. Moscow, 2025: 104 p. (In Russ.).
7. Malinin V. N. *Statisticheskiye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii: Tom 2. Analiz vremennykh ryadov i sluchaynykh poley = Statistical methods of analysis of hydrometeorological information: Volume 2. Analysis of time series and random fields*. St. Petersburg, izd. RGGMU, 2020: 190 p. (In Russ.).
8. Sivokhip Zh. T., Pavleichik V. M., Padalko Yu. A. Changes of minimum runoff in the Ural River basin. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya = Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2021; 85(6): (900—913). doi:10.31857/S2587556621060133. (In Russ.).
9. Kalinin V. G., Chichagov V. V., Gyrdymov D. A. Long-term fluctuations in the annual flow of the rivers in the upper and middle Kama catchment area. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle = Bulletin of Udmurt University. Biology. Geosciences series*. 2023; 33(4): (456—466). doi: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-456-466. (In Russ.).
10. Bolgov M. V., Korobkina E. A., Trubetskova M. D. et al. Present-day variations of the minimum runoff of the Volga basin rivers. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2014; 39(3): (187—194). doi: 10.3103/S1068373914030078. (In Russ.).

11. Bolgov M. V., Trubetskova M. D., Filimonova M. K., Filippova I. A. Modern changes in climate characteristics and probabilistic assessment of changes in minimum flow in the Volga River basin. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye = Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2014; (3): (83—99). doi: 10.35567/1999-4508-2014-3-7. (In Russ.).
12. Markov M. L., Gurevich Ye. V., Vinogradov A. YU. Minimum runoff of rivers on the Black Sea coast of Russia. *Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya = Hydrosphere. Hazardous processes and phenomena*. 2019; 1(3): (408—425). doi: 10.34753/HS.2019.1.3.003. (In Russ.).
13. Yakovlev P. I. Some features of the formation of minimum low-water and underground river flow in the upper part of the Western Dvina basin. *Vodnoye khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye = Water management of Russia: problems, technologies, management*. 2025; (5): (39—58). doi: 10.35567/1999-4508-2025-5-39-58. (In Russ.).
14. *Osnovnyye gidrologicheskiye kharakteristiki rek basseyna Kamy: Nauchno-prikladnoy spravochnik = Main hydrological characteristics of the rivers of the Kama basin: Scientific and applied handbook*. Edited by V. Yu. Georgievskiy. Electronic resource. Text and graphic data in PDF format (2 files: 25 MB). (In Russ.).
15. Davis D. L., Bouldin D. V. A measure of cluster separation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1979; PAMI-1(2): (224—227). doi: 10.1109/TPAMI.1979.4766909.

Сведения об авторах

Сакович Владимир Михайлович, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, sakovich@rshu.ru.

Сикан Александр Владимирович, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, sikan07@yandex.ru.

Железная Ангелина Андреевна, бакалавр, независимый исследователь, chikurova_2001@mail.ru.

Information about authors

Sakovich Vladimir Mikhailovich, PhD in geographical sciences, associate professor Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University.

Sikan Alexander Vladimirovich, PhD in geographical sciences, associate professor Associate Professor, Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University.

Zheleznaya Angelina Andreevna, bachelor's degree, independent researcher.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 04.12.2025

Принята в печать после доработки 16.02.2026

The article was received on 04.12.2025

The article was accepted after revision on 16.02.2026