УДК 543.3

https://doi.org/10.35567/19994508-2026-5-46-60

Оригинальная статья / Original paper

Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей поверхностных источников водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом

Л. П. Эрдниев[1], А. Н. Микеров[1, 2], С. В. Касимцев[1], Н. В. Касимцева[1], Т. А. Мухитдинова[1]

leonid-erdniev@yandex.ru

[1] *Саратовский медицинский научный центр гигиены «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, г. Саратов, Россия*

[2] *Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, г. Саратов, Россия*

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Негативные последствия изменения климата в России в большей степени проявляются на засушливых территориях с семиаридным климатом. Специфической проблемой этих территорий является высокая сезонная вариабельность гидрохимических показателей поверхностных водоисточников хозяйственно-питьевого водопользования, которая обусловливает эпизодическое несоответствие питьевой воды требованиям гигиенической безопасности. Разработка методов анализа и прогноза изменения качества воды в таких водоемах относится к списку приоритетных задач, определенных климатической доктриной. **Методы.** Для анализа климатических изменений использованы базы метеорологических данных, состояния поверхностных водных объектов – результаты физико-химического анализа 426 проб воды, отобранных за период 2023–2025 гг. Проведена статистическая обработка данных 26 гидрохимических показателей. **Результаты.** В рамках проведенной работы получен массив сопряженных данных о годовых и сезонных изменениях гидрохимических показателей в девяти водоемах, расположенных в Саратовской, Астраханской областях и Республике Калмыкии. Представлены результаты применения подхода, позволяющего провести кластерный анализ с разработкой дендрограммы иерархической кластеризации гидрохимических показателей. Данные анализа рекомендуется использовать для оценки и прогноза динамики изменения гидрохимических портретов водоемов на засушливых территориях, а также для индикации случаев эпизодических химических загрязнений водоемов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностные водоисточники, гидрохимические показатели, засушливость, кластерный анализ, линейная регрессия, водопользование

© Эрдниев Л. П., Микеров А. Н., Касимцев С. В., Касимцева Н. В., Мухитдинова Т. А., 2026

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Эрдниев Л. П., Микеров А. Н., Касимцев С. В., Касимцева Н. В., Мухитдинова Т. А. Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей поверхностных источников водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2026. № 5. С. 46–60; https://doi.org/10.35567/19994508-2026-5-46-60; EDN: DSAUFM

Results of a cluster analysis of hydrochemical parameters of surface water sources used by population on arid territories with semiarid climate

Leonid P. Erdniev[1], Anatoly N. Mikerov[1,2], Stanislav V. Kasimtsev[1], Natalya V. Kasimtseva[1], Tatyana A. Mukhitdinova[1]

leonid-erdniev@yandex.ru

[1] *Saratov Hygiene Medical Research Center of the Federal Budget Scientific Institution «Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies», Saratov, Russia*

[2] *Saratov State Medical University named after V. I. Razumovsky, Saratov, Russia*

ABSTRACT

Relevance. The negative consequences of climate change in Russia are most pronounced in arid territories with a semiarid climate. A specific problem in these territories is the high seasonal variability of hydrochemical parameters of domestic and drinking water sources, which leads to occasional non-compliance of drinking water with hygienic safety requirements. The development of methods for analyzing and predicting changes in water quality in such reservoirs is one of the priority tasks defined by the climate doctrine. **Methods.** To analyze climate change, we used the meteorological data base, and data on the surface water body status: results of physical/chemical analysis of 426 water samples taken in 2023-2025. We have statistically processed data of 26 hydro/chemical indicators. **Results.** This study obtained a dataset of conjugated annual and seasonal changes in hydrochemical parameters in nine water bodies located in the Saratov and Astrakhan regions and the Republic of Kalmykia. The results of an approach that allows for cluster analysis and the development of a dendrogram of hierarchical clustering of hydrochemical parameters are presented. The results of the analysis are recommended for use in assessing and predicting the dynamics of changes in the hydrochemical profiles of water bodies in arid areas, as well as for identifying cases of episodic chemical pollution in these water bodies.

KEYWORDS: surface water sources, hydrochemical parameters, aridity, cluster analysis, linear regression

FOR CITATION: Erdniev L. P., Mikerov A. N., Kasimtsev S. V., Kasimtseva N. V., Mukhitdinova T. A. Results of a cluster analysis of hydrochemical parameters of surface water sources used by population on arid territories with semiarid climate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management.* 2026. No. 5. P. 46–60. https://doi.org/10.35567/19994508-2026-5-46-60; EDN: DSAUFM

ВВЕДЕНИЕ

Изменение семиаридного климата на засушливых территориях России – одна из ведущих причин негативного воздействия на гидрохимические показатели вод поверхностных источников хозяйственно-питьевого водопользования населения. Специфической особенностью водоисточников на этих территориях является большая вариабельность значений гидрохимических показателей за счет сезонных изменений концентраций химических веществ [1–3]. В ряде случаев высокие концентрации химических веществ в водоисточнике выступают причиной несоответствия качества питьевой воды требованиям гигиенической безопасности и представляют риск здоровью населения. Поэтому расширение возможностей анализа влияния климатических факторов на гидрохимические показатели водных объектов и повышение достоверности долгосрочной оценки этих изменений становятся одними из важных оперативных мер, направленных на адаптацию к изменениям климата в соответствии с Климатической доктриной Российской Федерации[1].

Важным аспектом в исследовании гидрохимии водных объектов является статистическая обработка большого массива сопряженных данных, результаты которой, в частности, используются для оценки и прогнозирования гигиенической безопасности, реализации алгоритмов оценки заболеваемости, ассоциированной с воздействием водного фактора, и оценки эффективности программ по улучшению качества питьевой воды. Современные достижения в области развития методов статистического анализа данных, основанных на алгоритмах машинного обучения, позволяют в большей степени сделать этот процесс автономным, требующим от исследователя только выполнения операции по вводу значений гидрохимических показателей [4]. Такой подход, основанный на статистической обработке массива сопряженных значений гидрохимических показателей за несколько лет наблюдения, позволяет провести иерархическую кластеризацию показателей и построить дендрограмму для отдельно взятого водоема.

Анализ состояния вопроса показал, что данные о применении метода иерархической кластеризации гидрохимических показателей носят разрозненный характер и не имеют системного подхода к оценке влияния внешних факторов на водоемы. Наиболее часто встречаемый подход основан на использовании метода объединения водоемов в группы, схожие по дендрограммам кластеров гидрохимических показателей [5–7]. Однако на засушливых территориях России, где преобладает семиаридный климат, каждый водный объект является уникальным по своему гидрохимическому составу, и поэтому иерархическая кластеризация должна быть ориентирована на формирование индивидуальных «портретов водоемов» с учетом анализа многолетних наблюдений, учитываю-

1 Об утверждении климатической доктрины Российской Федерации: Указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812 // Собрание законодательства РФ № 44 (ст. 7865) от 30.10.2023. С. 20859 – 20869.

щих сезонные изменения химических веществ в воде. Именно такой подход позволит дифференцировать признаки климатического или антропогенного воздействия на водоемы, расположенные на засушливых территориях.

Цель представленной в статье работы – провести кластерный анализ гидрохимических показателей отдельно взятых поверхностных источников хозяйственно-питьевого водопользования населения на засушливых территориях с семиаридным климатом и проанализировать его результаты.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи: оценить гидрохимических показатели водных объектов на засушливых территориях в зоне влияния семиаридного климата; обосновать критерии для проведения иерархического кластерного анализа гидрохимических показателей; провести анализ с последующим описанием векторов развития направлений практического применения результатов исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа климатических изменений использованы базы метеорологических данных Саратовской, Астраханской, Рязанской областей и Республики Калмыкия за период 2014–2025 гг., размещенные на сайтах meteoblue.com, pogodaiklimat.ru. Для формирования библиотеки данных гидрохимических показателей аккумулированы результаты физико-химического анализа 426 проб воды, отобранных за период 2023–2025 гг. из поверхностных водоисточников Саратовской обл. (рек Большой Узень, Малый Узень, Еруслан), Астраханской обл. (рек Ахтуба, Ашулук, Бузан, Васильевская) и Республики Калмыкии (озеро Маныч-Гудило на реке Маныч, Гашунский канал). Частота отбора проб составляла три раза в год (весна, лето, осень) из водоисточников, расположенных на территории Саратовской и Астраханской обл. и 1 раз в год (весной) на территории Республики Калмыкии.

В ходе анализа оценивались 26 гидрохимических показателей воды: Cl^-, SO_4^{-2}, F^-, NH_3, NO_3^-, NO_2^-, PO_4^{-3}, Ni, Cd, Pb, Mn, Mg, Si, As, Fe, Na, Ca, Cu, Cr, Sr, Ba, B, Zn, Li, K, общая минерализация. Отбор проб воды и интерпретацию о их гигиенической безопасности проводили в соответствии с регламентирующими документами Роспотребнадзора[2,3].

Статистическая обработка данных велась с использованием программы для ЭВМ, разработанной Саратовским медицинским научным центром гигиены, основанной на использовании метода Монте-Карло для выборок сред-

2 МР 2.1.4.0176–20 Организация мониторинга обеспечения населения качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения. Методические рекомендации / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2020. 14 с.

3 Постановление главного государственного санитарного врача от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62296.

него объема и стандартных методов библиотеки SciPy для больших выборок (свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026664214 от 14.05.2026) [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В период с 2023 по 2025 г. специалистами Саратовского медицинского научного центра гигиены были оценены гидрохимические показатели поверхностных источников хозяйственно-питьевого водопользования населения, характеризующихся малой водностью и расположенных на засушливых территориях Саратовской, Астраханской обл. и Республики Калмыкии в зоне влияния семиаридного климата [9]. Результаты анализа баз данных отечественных и иностранных архивов информагентств[4],[5] показали, что в сравнении с центральной частью России негативное изменение климата на этих территориях за последнее десятилетие подтверждается сокращением количества выпадаемых годовых осадков, повышением среднегодовой температуры воздуха, увеличением числа засушливых дней в году. Результаты анализа средних скользящих за период 2014–2025 гг. представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ изменения климатических показателей на засушливых территориях и в средней полосе России за период 2014-2025 гг.

Table 1. Comparative analysis of changes in climate indicators on arid territories and in central Russia for the period 2014–2025

Климатический показатель	Республика Калмыкия	Саратовская обл.	Астраханская обл.	Средняя полоса России
Изменение числа дней в году с количеством осадков 10 мм и менее	+30	+60	+18	−30[1]
Изменение средней годовой температуры, °С	+0,9	+0,5	+0,3	+0,5
Изменение количества годовых осадков, мм	−30	−22	−11	+83[1]
Средняя годовая температура воздуха, °С	11,4	8,5	11,8	5,1
Годовое количество атмосферных осадков, мм	366	327	201	463[1]

Примечание: 1 – при сравнении за показатели средней полосы России представлены параметры Рязанской области.

По данным исследователей, именно эти специфические климатические изменения на засушливых территориях являются ведущей причиной сезонных изменений концентраций химических веществ природного происхождения в поверхностных водоисточниках с малой водностью [10–12]. На основании исследования 436 проб воды, отобранных из поверхностных источников, были проанализированы годовая и сезонная динамики изменений концентраций 26 гидрохимических показателей. Результаты показали, что концентрация

4 Meteoblue [Электр. ресурс]: URL: https://www.meteoblue.com/ru/погода/historyclimate/change (дата обращения: 27.07.2026).

5 Погода и климат [Электр. ресурс]: URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/34391.htm (дата обращения: 27.07.2026).

большинства химических веществ повышалась в воде в летне-осенний период и снижалась в зимне-весенний [1–3]. По обобщенным данным, на исследуемых территориях вариабельность концентраций отдельных веществ доходила до 20 раз в водоисточниках, используемых для хозяйственно-питьевого водопользования населением, и до 60 раз в водоемах, которые не используются для этих целей. Наибольшей вариабельностью характеризовались такие соединения, как хлориды, сульфаты, свинец, никель, марганец, мышьяк, кадмий, железо в водоисточниках, не используемых для хозяйственно-питьевого водопользования. Однако в ряде случаев высокие концентрации никеля, марганца, кадмия и железа в водоисточниках хозяйственно-питьевого водопользования являлись причиной несоответствия питьевой воды санитарно-гигиеническим требованиям, установленным СанПиН 1.2.3685-21. Данный факт создает риски здоровью населения, обусловленные воздействием химического фактора в результате хронического перорального поступления этих веществ с питьевой водой.

Таблица 2. Средние показатели вариабельности концентраций ряда химических веществ в воде поверхностных водоисточников на засушливых территориях с семиаридным климатом за период 2023–2025 гг.

Table 2. Average variability of concentrations of a number of chemical substances in surface water sources in arid areas with a semi-arid climate for the period 2023–2025

Гидрохимический показатель	Вариабельность концентрации гидрохимических показателей, C_{max}/C_{min}		Максимальная выявленная концентрация веществ в питьевой воде относительно нормативных значений, C_{max}/ПДК
	В источниках хозяйственно-питьевого водопользования	В источниках, не используемых для хозяйственно-питьевого водопользования	
Хлориды (Cl^{-})	4	6	0,9
Сульфаты (SO_4^{-2})	2	3	0,4
Свинец (Pb)	3	50	0,8
Никель (Ni)	6	20	2,6
Марганец (Mn)	8	60	6,2
Мышьяк (As)	9	7	0,8
Кадмий (Cd)	9	не выявлено	1,6
Железо (Fe)	20	6	3,3

Изучение сезонной динамики изменений концентраций химических веществ показало возможность применения метода кластерного анализа для обработки массива данных исследования проб воды из поверхностных источников. В качестве главного кластерного признака обоснована схожесть динамики сезонных изменений концентраций химических веществ в поверхностном водоисточнике. Критерием отбора гидрохимических показателей в кластер был выбран коэффициент ранговой корреляции Спирмена между концентрациями

веществ ($r \geq 0{,}7$ или $r \leq -0{,}7$)) с уровнем статистической значимости ($p < 0{,}05$), что обосновывает «высокую» и «весьма высокую» тесноту связи переменных по шкале Чеддока. С учетом обозначенных критериальных положений для обработки массива данных сотрудниками Саратовского МНЦ гигиены была разработана программа статистического анализа санитарно-химических показателей воды [5], основанная на использовании метода Монте-Карло для выборок среднего объема [13, 14] и стандартных методов библиотеки SciPy для больших выборок [15]. Программа позволила провести автоматическую обработку входных данных, фильтрацию некорректных значений, расчет коэффициентов ранговой корреляции Спирмена, определение статистически значимых взаимосвязей между показателями и визуализацию результатов в виде тепловых карт корреляции и дендрограмм иерархической кластеризации [16].

С использованием обоснованных признаков и критериев проведен кластерный анализ массива данных, полученных в результате химического анализа проб воды из рек Большой Узень (п. Александров Гай) и Ахтуба (г. Ахтубинск) – источников хозяйственно-питьевого водопользования населения [17–19] для более 100 тыс. человек, проживающих на засушливых территориях Саратовской и Астраханской обл.

Результаты статистического анализа позволили объединить ряд гидрохимических показателей в кластеры: в частности, для р. Большой Узень выявлено шесть кластеров, включающих 13 показателей. Для р. Ахтубы статистическая обработка данных позволила определить пять кластеров, включающих 10 показателей. Результаты анализа представлены в табл. 3.

За период наблюдения также установлены значимые статистические связи между парами показателей: в р. Большой Узень – железо (Fe) и марганец (Mn) ($r = 0{,}95$), свинец (Pb) и магний (Mg) ($r = 0{,}79$); в р. Ахтубе – никель (Ni) и свинец (Pb) ($r = -0{,}89$).

Результаты проведенного исследования показали, что на засушливых территориях России поверхностные водоемы остаются приоритетными источниками хозяйственно-питьевого водопользования населения. При этом изменение климата и связанное с ним прогрессирующее негативное влияние на водоисточники проявляются в виде высокой вариабельности гидрохимических показателей, которая является причиной возникновения эпизодических рисков для здоровья населения, обусловленных воздействием химического фактора. Для сохранения здоровья и раннего предупреждения возникновения рисков Роспотребнадзором[6] организован системный мониторинг за качеством воды

6 Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 3 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». Зарег. в Минюсте России 29.01.2021 № 62297.

Таблица 3. Результаты кластерного анализа гидрохимических показателей воды в реках Большой Узень и Ахтуба (2023–2025 гг.)

Table 3. Results of cluster analysis of hydrochemical parameters of water in the Bolshoy Uzen and Akhtuba rivers (2023–2025)

Гидрохимический показатель	Кластеры и значения ранговой корреляции Спирмена для пар показателей, (*r*)					
	Хлориды	Сульфаты	Фториды	Кальций	Бор	Общая минерализация
р. Большой Узень (Саратовская обл.)						
Хлориды (Cl-)	1,00	0,95	0,70*	0,92	0,94	0,95
Сульфаты (SO_4^{-2})	0,95	1,00	0,57*	0,98	0,94	0,90
Фториды (F^-)	0,70*	0,57*	1,00	0,53*	0,54*	0,55*
Натрий (Na)	0,97	0,92	0,60*	0,87	0,83*	0,92
Магний (Mg)	0,98	0,93	0,70	0,88	0,83*	0,93
Кальций (Ca)	0,92	0,98	0,53*	1,00	0,89	0,87
Бор (B)	0,94	0,94	0,54*	0,89	1,00	0,94
Кремний (Si)	−0,49*	−0,49*	−0,89	−0,43*	−0,54*	−0,49*
Медь (Cu)	−0,71*	−0,71*	−0,33*	−0,60*	−0,89	−0,71*
Марганец (Mn)	−0,45*	−0,38*	−0,52*	−0,45*	0,65*	−0,25*
р. Ахтуба (Астраханская обл.)						
Хлориды (Cl-)	1,00	0,94*	0,89	0,77*	0,90*	0,94
Сульфаты (SO_4^{-2})	0,94	1,00	0,94	0,83*	0,90*	1,00
Фториды (F^-)	0,89	0,94	1,00	0,94	0,70*	0,94
Марганец (Mn)	0,98	0,94	0,89	0,77*	0,90*	0,94
Натрий (Na)	0,83*	0,77*	0,89	0,94	0,60*	0,77*
Магний (Mg)	0,77*	0,83*	0,94	1,00	0,60*	0,83*
Кальций (Ca)	0,77*	0,83*	0,94	1,00	0,60*	0,83*

Примечание: * – не соответствует критериям кластерного отбора ($p > 0,05$ или $r < 0,7$).

в источниках хозяйственно-питьевого водоснабжения, в ходе которого формируются большие библиотеки данных, описывающих многолетнюю динамику изменения санитарно-химических показателей воды по водоисточникам. В современных условиях развития технологий машинного обучения и модернизации статистических методов создаются условия для разработки подходов, направленных на систематизацию данных библиотек на основе программных продуктов. В частности, использование модели на основе алгоритма линейной регрессии позволяет сформировать кластеры санитарно-химических показа-

телей. В представленной работе практическая апробация линейной модели позволила провести анализ данных и получить результаты, имеющие большую практическую значимость в направлении изучения и прогнозирования влияния климатических факторов на гидрохимические показатели поверхностных водных объектов, а также выявления эпизодических фактов химического загрязнения в результате антропогенного воздействия.

Достоверность результатов экстраполяции изменения концентраций гидрохимических показателей под влиянием климатических факторов определяется высокой статистической связью, характеризующей сезонные изменения концентраций веществ внутри кластеров, и сохранением структуры дендрограммы иерархической кластеризации. В этом случае при изменении значений гидрохимических показателей не происходит разрушения кластеров и дендрограммы иерархической кластеризации [20, 21]. Дендрограммы гидрохимических показателей рек Ахтуба и Большой Узень представлены на рис.1 и рис. 2.

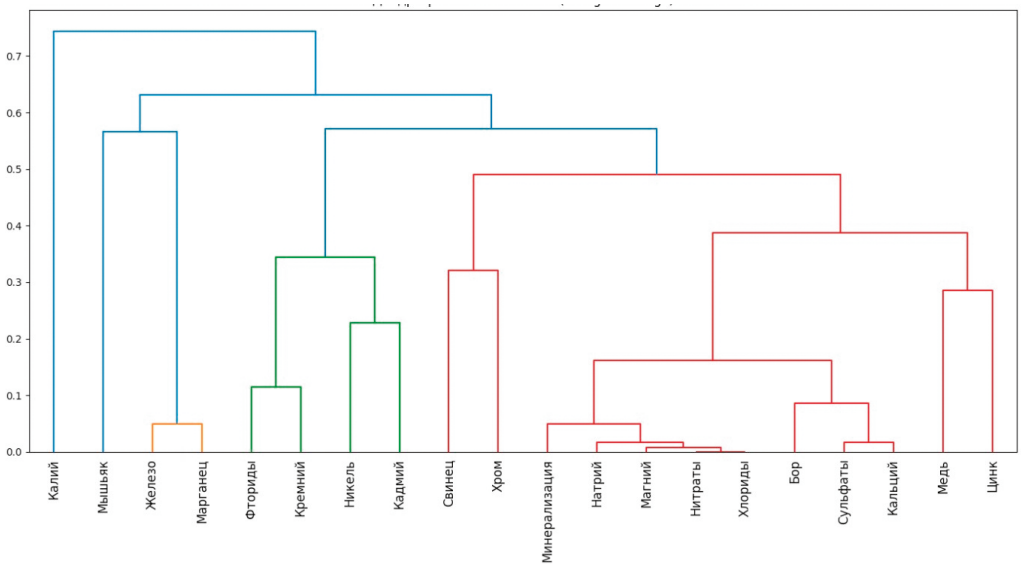


Рис. 1. Дендрограмма иерархической кластеризации гидрохимических показателей реки Ахтуба

Fig. 1. Dendrogram of hierarchical clustering of hydrochemical indicators of the Akhtuba River

В случае антропогенного воздействия предполагаемым маркерным признаком необходимо рассматривать ситуацию, когда происходит разрушение кластера по причине изменения статистических связей в результате значительного изменения значения какого-либо одного или нескольких гидрохимических показателей [22–24]. В этом случае разрушение кластера приводит к изменению дендрограммы иерархической кластеризации гидрохимических показателей. Поэтому наличие необоснованного изменения дендрограммы по

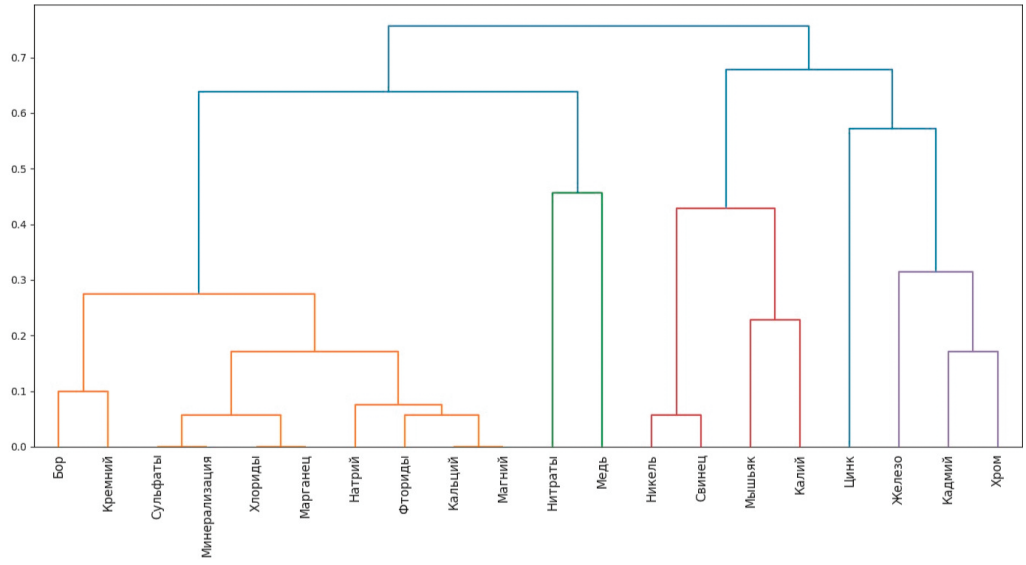


Рис. 2. Дендрограмма иерархической кластеризации гидрохимических показателей реки Большой Узень

Fig. 2. Dendrogram of hierarchical clustering of hydrochemical parameters of the Bolshoy Uzen River

причине разрушения кластера (кластеров) необходимо в первую очередь рассматривать как признак потенциального внешнего химического воздействие на водоисточник. Однако следует отметить факт относительности такого подхода к выявлению внешнего химического воздействия на водный объект ограниченным перечнем гидрохимических показателей, формирующих дендрограмму оцениваемого водоисточника или коротким периодом наблюдения, за который собрана база данных. Как показало исследование, в реках Большой Узень и Ахтуба наибольшую значимость при формировании кластеров показали хлориды, сульфаты, фториды, кальций, натрий, бор, магний, марганец. Выявленные статистические связи между динамикой изменения концентраций пар металлов также могут рассматриваться как индикаторы воздействия и косвенно свидетельствовать о химическом воздействии в случаях нарушения этих связей.

ВЫВОДЫ

В работе использованы результаты собственных исследований гидрохимических показателей поверхностных водоисточников, расположенных на засушливых территориях Саратовской и Астраханской областей и Республики Калмыкии в зоне влияния семиаридного климата. Обоснованные критерии для проведения иерархического кластерного анализа гидрохимических показателей в полной мере соответствуют критериям доказательности статистической связи между переменными при использовании непараметрического метода.

Результаты проведенного иерархического кластерного анализа показали, что методы статистического анализа с использованием алгоритмов машинного обучения позволяют провести обработку массива сопряженных данных с последующей иерархической кластеризацией гидрохимических показателей для отдельно взятых источников, расположенных на засушливых территориях.

В качестве вектора практического применения результатов иерархического кластерного анализа предложен подход, основанный на сохранности дендрограммы, который позволит дифференцировать признаки воздействия климатических и антропогенных факторов на поверхностные водоисточники, расположенные на засушливых территориях в зоне влияния семиаридного климата.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS
The authors declare no relevant conflict of interests.

Описание применения генеративной модели: В работе использовался генеративный искусственный интеллект платформы Giga.chat для поиска информации о применяемых методах кластерного анализа и причин изменения иерархической кластеризации, размещенной в базе научных библиотек eLibrary, google.scholar, pubmed, cyberleninka, medline, elsevier. Использовалась большая языковая модель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622638 Российская Федерация. База данных санитарно-химических показателей питьевой воды и воды источников питьевого водоснабжения, расположенных на территориях Новоузенского, Александрово-Гайского, Озинского, Ершовского, Федоровского районов Саратовской области за 2023 год / Л. П. Эрдниев, А. Н. Микеров, В. А. Чекмизов. Заявл. 22.05.2025, опубл. 19.06.2025.
2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623342 Российская Федерация. База данных санитарно-химических показателей питьевой воды и воды источников питьевого водоснабжения, расположенных на территориях Красноярского, Ахтубинского, Харабалинского и Володарского районов Астраханской области за 2024 год / Л. П. Эрдниев, А. Н. Микеров, В. А. Чекмизов. Заявл. 02.07.2025, опубл. 13.08.2025.
3. Мухитдинова Т. А., Касимцева Н. В., Эрдниев Л. П., Микеров А. Н. Анализ климатических факторов, оказывающих потенциальное негативное воздействие на санитарно-химические показатели воды систем центрального водоснабжения населения, расположенных на территориях с семиаридным климатом и с разной степенью засушливости // Перспективы экологического развития России и стран СНГ: мат-лы 7-й Межд. научно-практ. конференции. Екатеринбург, 6–8 апреля 2026. С. 57–62.
4. Нагметова А. Эволюция методов анализа данных: от традиционной статистики к машинному обучению // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 6 (87). С. 1249–1264.
5. Рогозин А. Г. Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 711—724. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-73-711-724
6. Кондратьева Т. А., Исмаилова Р. Н., Волостнова О. И. Выявление закономерностей пространственного распределения загрязнения поверхностных вод республики Татарстан с использованием методов многомерной статистики. Сообщение 1. Кластерный анализ и метод главных компонент // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 18. С. 275–281.

7. Синькова И. С., Шестеркин В. П., Шестеркина Н. М. и др. Антропогенное влияние на химический состав вод малых рек Хабаровска в зимнюю межень // География и природные ресурсы. 2024. Т. 45. № 3. С. 91–97. https://doi.org/10.15372/GIPR20240309
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026664214, Российская Федерация. Программа статистического анализа санитарно-химических показателей воды водных объектов, используемых для водопользования населения на территориях с семиаридным климатом / М. А. Горенков, Л. П. Эрдниев, Р. Ш. Валиев, А. Н. Микеров. Заявл. 14.05.2026, опубл. 14.05.2026.
9. Титкова Т. Б. Современные климатические тенденции изменений испарения и влажности почвы на юге Европейской России // Аридные экосистемы. 2023. Т. 29. № 3 (96). С. 4–14. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-3-4-14
10. Сангаджиев М. М., Сангаджиева Р. С., Сангаджиева А. С. и др. Опасные природные явления: влияние динамики гидросферы на климат степных и пустынных зон Калмыкии // Московский экономический журнал. 2021. № 6. С. 248–255. https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10345
11. Сангаджиев М. М., Манджиева Т. В., Эрдниев О. В. и др. Водные ресурсы Калмыкии: родники, колодцы, водохранилища, озера, реки и водно-болотные угодия. СПб: Изд. дом Scientia, 2025. 120 с.
12. Григоренко К. С., Матишов Г. Г. Минерализация малых водотоков Восточного Приазовья в современных маловодных условиях // Метеорология и гидрология. 2025. № 11. С. 124–131. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-11-124-131
13. Jabarullah Khan N. K., Elsheikh A. H. A machine learning based hybrid Multi-fidelity multi-level Monte Carlo method for uncertainty quantification // Frontiers in Environmental Sciences. 2019. Vol. 7. Art. 105. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00105
14. Jia Yongna & Yu Siwei & Ma Jianwei. Intelligent interpolation by Monte Carlo machine learning // Geophysics. 2018. Vol. 83. No. 2. https://doi.org/10.1190/geo2017-0294.1
15. Virtanen P., Gommers R., Oliphant T. E. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python // Nature Methods. 2020. No. 17. P. 61–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
16. Кисляков А. Н., Поляков С. В. Иерархические методы кластеризации в задаче поиска аномальных наблюдений на основе групп с нарушенной симметрией // Управленческое консультирование. 2020. № 5 (137). С. 116–127. https://doi.org/10.22394/1726-1139-2020-5-116-127
17. Полиданов М. А., Масляков В. В., Гуменный А. В. и др. Анализ экологической безопасности водных объектов на территории Саратовской области // Вода: химия и экология. 2024. № 2. С. 71–76.
18. Болгов М. В., Демин А. П. Водохозяйственные и экологические проблемы Нижней Волги и пути их решения // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 2. С. 211–220. https://doi.org/10.7868/S0321059618020116
19. Сокольская Е. А., Золотарева Н. В., Локтионова Е. Г. Мониторинг состояния воды реки Ахтубы для оценки качества жизни населения Красноярского района Астраханской области // Естественные науки. 2023. № 3 (12). С. 28–37. https://doi.org/10.54398/1818507X_2023_3_28
20. Shenbagalakshmi G., Shenbagarajan A., Thavasi S. *et al*. Determination of Water Quality indicator using deep hierarchical cluster analysis // Urban Climate. 2023. Vol. 49. Art. 101468. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101468
21. Gao Y., Fang H., Ni K., Feng Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 8036. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6
22. Мусаев Ш. Ж., Елисеев Ю. Ю., Луцевич И. Н. Механизмы поведения химических соединений в поверхностном, объемном слоях и донных отложениях водоемов при их антропогенном загрязнении // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1–8. С. 1914–1916.

23. Tiri A., Lahbari N., & Boudoukha A. Assessment of the quality of water by hierarchical cluster and variance analyses of the Koudiat Medouar Watershed, East Algeria // Applied water science. 2017. Vol. 7. P. 4197–4206. https://doi.org/10.1007/s13201-014-0261-z
24. Zahoránszky L. A., Katona G. Y., Hári P. *et al*. Breaking the hierarchy – a new cluster selection mechanism for hierarchical clustering methods // Algorithms in molecular biology. 2009. Vol. 4. Art. 12. https://doi.org/10.1186/1748-7188-4-12

REFERENCES

1. Erdniev L. P., Mikerov A. N., Chekmizov V.A. Certificate of state registration of database No. 2025622638 Russian Federation. Database of sanitary and chemical indicators of drinking water and water from drinking water supply sources located in the Novouzensky, Aleksandrovo-Gaisky, Ozinsky, Yershovsky, and Fyodorovsky districts of the Saratov region for 2023. Declared 22.05.2025, published 19.06.2025.
2. Erdniev L. P., Mikerov A. N., Chekmizov V. A. Certificate of state registration of database No. 2025623342 Russian Federation. Database of sanitary and chemical indicators of drinking water and water from drinking water supply sources located in the Krasnoyarsk, Akhtubinsky, Kharabalinsky and Volodarsky districts of the Astrakhan region for 2024 Declared 02.07.2025, published 13.08.2025.
3. Mukhitdinova T. A., Kasimtseva N. V., Erdniev L. P., Mikerov A. N. Analysis of climatic factors that have a potential negative impact on the sanitary and chemical parameters of water in central water supply systems for the population located in areas with a semi-arid climate and varying degrees of aridity. Prospects for the environmental development of Russia and the CIS countries: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference held within the framework of the XXIII Ural Mining and Industrial Decade, Yekaterinburg, April 6–8, 2026. P. 57–62.
4. Nagmetova A. Evolution of data analysis methods: from traditional statistics to machine learning. *Science Bulletin*. 2025. Vol. 4. No. 6 (87). P. 1249–1264.
5. Rogozin A. G. Classification of water bodies in the Southern Urals by trophic type using multivariate statistical analysis methods. *Hydrometeorology and Ecology*. 2023. No. 73. P. 711–724. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-73-711-724
6. Kondratyeva T. A., Ismailova R. N., Volostnova O. I. Identifying patterns in the spatial distribution of surface water pollution in the Republic of Tatarstan using multivariate statistical methods. Report 1. Cluster analysis and the principal component method. *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2013. Vol. 16. No. 18. P. 275–281.
7. Sinkova I. S., Shesterkin V. P., Shesterkina N. M. *et al.* Anthropogenic impact on the chemical composition of water in small rivers of Khabarovsk during the winter low-flow period. *Geography and Natural Resources*. 2024. Vol. 45. No. 3. P. 91–97. https://doi.org/10.15372/GIPR20240309
8. Gorenkov M. A., Erdniev L. P., Valiev R. Sh., Mikerov A. N. Certificate of state registration of the computer program No. 2026664214 Russian Federation. Program for statistical analysis of sanitary and chemical indicators of water in water bodies used for water use by the population on territories with a semi-arid climate. Declared 14.05.2026. Published 14.05.2026.
9. Titkova T. B. Modern climatic trends in changes in evaporation and soil moisture in the south of European Russia. *Arid ecosystems*. 2023. Vol. 29. No. 3 (96). P. 4–14. https://doi.org/10.24412/1993-3916-2023-3-4-14
10. Sangadzhiev M. M., Sangadzhieva R. S., Sangadzhieva A. S. *et al*. Hazardous natural phenomena: the influence of hydrosphere dynamics on the climate of the steppe and desert zones of Kalmykia. *Moscow Economic Journal*. 2021. No. 6. P. 248–255. https://doi.org/10.24412/2413-046X-2021-10345

11. Sangadzhiev M. M., Mandzhieva T. V., Erdniev O. V. *et al*. Water resources of Kalmykia: springs, wells, reservoirs, lakes, rivers and wetlands. St. Petersburg: Publishing House “Scientia”. 2025. 120 p.
12. Grigorenko K. S., Matishov G. G. Mineralization of small watercourses of the Eastern Azov region in modern low-water conditions. *Meteorology and Hydrology*. 2025. No. 11. P. 124–131. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2025-11-124-131
13. Jabarullah Khan N. K., Elsheikh A. H. A machine learning based hybrid Multi-fidelity multi-level Monte Carlo method for uncertainty quantification. *Frontiers in Environmental Sciences.* 2019. Vol. 7. Art. 105. https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00105
14. Jia Yongna & Yu Siwei & Ma Jianwei. Intelligent interpolation by Monte Carlo machine learning. *Geophysics*. 2017. Vol. 83. No. 2. https://doi.org/10.1190/geo2017-0294.1
15. Virtanen P., Gommer R., Oliphant T. E. *et al*. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods.* 2020. No. 17. P. 61–272. https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2
16. Kislyakov A. N., Polyakov S. V. Hierarchical clustering methods in the problem of searching for anomalous observations based on groups with broken symmetry. *Management Consulting*. 2020. No. 5 (137). P. 116–127. https://doi.org/10.22394/1726-1139-2020-5-116-127
17. Polidanov M. A., Maslyakov V. V., Gumenny A. V. *et al*. Analysis of environmental safety of water bodies in the Saratov region. *Water: chemistry and ecology*. 2024. No. 2. P. 71–76.
18. Bolgov M. V., Demin A. P. Water management and environmental problems of the Lower Volga and ways to solve them. *Water resources*. 2018. Vol. 45. No. 2. P. 211–220. https://doi.org/10.7868/S0321059618020116
19. Sokolskaya E. A., Zolotareva N. V., Loktionova E. G. Monitoring the water condition of the Akhtuba River to assess the quality of life of the population of the Krasnoyarsk district of the Astrakhan region. *Natural sciences*. 2023. No. 3 (12). P. 28–37. https://doi.org/ 10.54398/1818507X_2023_3_28
20. G. Shenbagalakshmi, & A. Shenbagarajan, & S. Thavasi *et al*. Determination of Water Quality indicator using deep hierarchical cluster analysi. *Urban Climate*. 2023. Vol. 49. Art. 101468. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101468
21. Gao Y., Fang H., Ni K., Feng Y. Water clusters and density fluctuations in liquid water based on extended hierarchical clustering methods. *Scientific Reports.* 2022. Vol. 12. Art. 8036. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11947-6
22. Musaev Sh. Zh., Eliseev Yu. Yu., Lutsevich I. N. Mechanisms of behavior of chemical compounds in the surface, volumetric layers and bottom sediments of water bodies during their anthropogenic pollution. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011. Vol. 13. No. 1–8. P. 1914–1916.
23. Tir A., Lahbari N., Boudoukha A. Assessment of the quality of water by hierarchical cluster and variance analyses of the Koudiat Medouar Watershed, East Algeria. *Applied water science*. 2017. Vol. 7. P. 4197–4206. https://doi.org/10.1007/s13201-014-0261-z
24. Zahoránszky L. A., Katona G. Y., Hári P. et al. Breaking the hierarchy – a new cluster selection mechanism for hierarchical clustering methods. *Algorithms in molecular biology*. 2009. Vol. 4. Art. 12. https://doi.org/10.1186/1748-7188-4-12

Сведения об авторах:

Эрдниев Леонид Петрович (корреспондирующий автор), канд. мед. наук, профессор Академии военных наук РФ, ведущий научный сотрудник лаборатории гигиенических методов исследования факторов окружающей среды, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0000-0001-5187-7361; e-mail: leonid-erdniev@yandex.ru

Микеров Анатолий Николаевич, д-р биол. наук, руководитель Саратовского МНЦ гигиены, профессор кафедры микробиологии, вирусологии и иммунологии, Саратовский государственный медицинский университет им. В. И. Разумовского, 410012, Россия, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112; https://orcid.org/0000-0002-0670-7918; e-mail: mail@smncg.ru

Касимцев Станислав Викторович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории гигиенических методов исследования факторов окружающей среды, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФГБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0009-0003-5461-6396; e-mail: staskas73@mail.ru

Касимцева Наталья Викторовна, младший научный сотрудник лаборатории физико-химического анализа, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФГБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0009-0002-6231-4112; e-mail: kas-nat75@mail.ru

Мухитдинова Татьяна Алексеевна, младший научный сотрудник лаборатории физико-химического анализа, Саратовский медицинский научный центр гигиены ФГБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения», 410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А, зд. 1; https://orcid.org/0009-0005-2222-5221; e-mail: mail@smncg.ru

About the authors:

Leonid P. Erdniev (corresponding author), Candidate of Medical Sciences, Professor of Academy of Military Sciences of the Russian Federation, Leading Researcher, Laboratory of Hygienic Methods of Environment Factors Impact Research, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, ul. Zarechnaya, 1A, Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0000-0001-5187-7361; e-mail: leonid-erdniev@yandex.ru

Anatoly N. Mikerov, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Razumovsky Saratov State Medical University Chair of Microbiology, Virology and Immunology, ul. Bolshaya Kazachya, 112, Saratov 410012, Russia; Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0000-0002-0670-7918; email: mail@smncg.ru

Stanislav V. Kasimtsev, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Hygienic Methods for Studying Environmental Factors, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0009-0003-5461-6396; email: staskas73@mail.ru

Natalya V. Kasimtseva, Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Analysis.

Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0009-0002-6231-4112; email: kas-nat75@mail.ru

Tatyana A. Mukhitdinova, Junior Researcher, Laboratory of Physicochemical Analysis, Saratov Medical Research Center of Hygiene, Federal Scientific Center for Medical and Preventive Technologies for Public Health Risk Management, 1A, Zarechnaya St., Saratov, 410022, Russia; https://orcid.org/0009-0005-2222-5221; e-mail: mail@smncg.ru

Поступила в редакцию / Received 30.07.2026.
Поступила после рецензирования / Revised 14.08 2026.
Принята к публикации / Accepted 24.09.2026.