

Гидрометеорология и экология. 2023. №73. С. 711—724.

Hydrometeorology and Ecology. 2023;(73):711—724.

Научная статья

УДК [556.55:574.5](470.55/.58)

doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-711-724

Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа

Александр Генрихович Рогозин

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения РАН, Миасс, Россия, rogozin57@gmail.com

Аннотация. Проведена классификация 19 водоемов Южного Урала на основе биопродукционно-гидрохимических данных методами многомерной статистики. Среди 17 озер и 2 водохранилищ выделены группы олиготрофных (Аракуль, Большой Еланчик, Еловое, Иткуль, Тургояк, Увильды и Ирмельское водохранилище), мезотрофных (Большой Ишкуль, Большой Кисегач, Большое Миассово, Ильменское, Карматкуль, Сириткуль, Сугояк и Аргазинское водохранилище) и эвтрофных (Большой Таткуль, Малый Теренкуль, Смолино, Табанкуль) водоемов. Многие из них имеют переходный трофический статус. Для классификации южноуральских водоемов по продуктивности наибольшее значение имеют вещества азотной группы, а среди них — содержание в воде нитритов.

Ключевые слова: озера, водохранилища, Южный Урал, трофический статус, биогенные вещества, классификация, многомерная статистика.

Благодарности: работа проведена при поддержке госзадания Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии Уральского отделения РАН (тема АА-А-А19-119101490003-1). Автор благодарен коллегам за существенную помощь – Гаврилкиной С. В. за организацию сбора и анализа гидрохимических проб, Щетининой О. В. за участие в статистической обработке материала.

Для цитирования: Рогозин А. Г. Классификация водоемов Южного Урала по трофическому типу методами многомерного статистического анализа // Гидрометеорология и экология. 2023. № 73. С. 711—724. doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-711-724.

Original article

Trophic Classification of the South Ural water bodies by multivariate statistics

Alexander G. Rogozin

South Ural Scientific Centre Mineralogy and Environmental Geology of the Ural branch
Russian Academy of Sciences, Miass, Russia, rogozin57@gmail.com

Summary. The widespread and increasing anthropogenic eutrophication, as well as climate change, affects the productivity of water bodies. This makes knowledge of the trophic status of as many water bodies

as possible in different natural and climatic zones of Russia more and more relevant. Our main problem was to classify 19 most important reservoirs of the Southern Urals by trophic state on the basis of hydrochemical and hydrophysical data. Classifying by traditional methods on the base of summary indicators may be incorrect due to significant seasonal, spatial and long-term fluctuations in the values of the main studied data in all studied reservoirs.

The following indicators were used to classify water bodies: the content of substances of the nitrogen group (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), orthophosphates (HPO_4^{2-}), total phosphorus (P_{tot}), as well as color ($^{\circ}\text{Pt-Co}$) and permanganate oxidizability (PO). Between 2002 and 2019 19 water bodies of the Southern Urals were studied (lakes and reservoirs).

For the correct processing of a large data array and the exclusion of a subjective factor in identifying the trophic status, it was decided to process the data array using the methods of multivariate statistics. Using cluster analysis based on a data array, 3 clusters were identified among 19 reservoirs of the Southern Urals. This result was also confirmed by multidimensional scaling. By using correspondence analysis, these clusters were explained as trophic states of water bodies (oligo-, meso- and eutrophic).

The oligotrophic class includes lakes Arakul, Bolshoi Elanchik, Spruce, Itkul, Turgoyak, Uvildy and the Iremel reservoir, mesotrophic — lakes Bolshoy Ishkul, Bolshoy Kisegach, Bolshoye Miassovo, Ilmenskoye, Karmatkul, Siritkul, Sugoyak and Argazinskoye reservoir, eutrophic — Bolshoi Tatkul, Maly Terenkul, Smolino, Tabankul. Some water bodies have a transitional trophic state.

Among the main hydrochemical indicators, the substances of the nitrogen group are of the greatest importance for the trophic classification of the South Ural water bodies, and among them the content of nitrites in the water.

Keywords: lakes, reservoirs, Southern Urals, trophic state, organic substances, classification, multivariate statistics.

Acknowledgments. The work was carried out with the support of the state assignment of the South Ural Scientific Centre Mineralogy and Environmental Geology of the Ural branch Russian Academy of Sciences (theme AAA-A19-119101490003-1). The author is grateful to colleagues for their valuable help — to Gavrilkina S. V. for organization of collection and analysis of hydrochemical samples, to Schetina O. V. for participation in the statistical processing of the material.

For citation: Rogozin A. G. Trophic Classification of the South Ural water bodies by multivariate statistics. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(73):711—724. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-73-711-724.

Введение

Классификация озер и озеровидных водоемов по биологической продуктивности предложена в основополагающих трудах Э. Науманна и А. Тинеманна [1, 2, 3]. Эта типология была основана на связи комплекса абиотических факторов среды (прозрачность, цветность, содержание биогенных веществ и др.) с продуктивностью (трофическим типом) водоема. В дальнейшем она получила развитие в многочисленных работах последователей, значительно дополнивших и усовершенствовавших первоначальную классификацию [4, 5, 6—13]. Большую популярность приобрели классификационные шкалы, основанные на интегральных показателях, таких как прозрачность воды [10], концентрация хлорофилла *a* [14] и др. Трофическая классификация была также встроена в общую систему оценки качества вод [15].

В связи с повсеместным распространением и нарастающим ускорением антропогенного эвтрофирования [16], а также серьезными климатическими сдвигами, влияющими на уровень продуктивности водоемов, становится все более актуальным знание о трофическом статусе как можно большего числа озер и озеровидных водоемов в разных природно-климатических зонах России. Южный Урал — один

из наиболее «озерных» регионов страны [17], и здесь названная проблема стоит очень остро. В частности это касается большого количества озер — памятников природы, рекреационных водоемов, водохранилищ — источников водоснабжения крупных промышленных центров. Казалось бы, вопрос трофической типологии в настоящее время прекрасно разработан, однако ни одна из систем классификации не дает точной и, главное, устойчивой оценки трофности. Трудности создает также их практическое применение.

Использование интегральных показателей (TSI Карлсона и его аналоги) не всегда приемлемо: например, содержание хлорофилла *a* и прозрачность характеризуют трофический статус эпилимниона и не отражают ситуацию в водоеме в целом, и в ряде случаев могут давать неправильные оценки [4]. Данные по биомассе и составу планктона достаточно показательны, но требуют наличия подготовленного специалиста-альголога, что далеко не всегда и везде возможно.

Несмотря на многочисленность различных подходов к оценке трофического статуса следует признать, что содержание биогенных веществ является одним из наиболее надежных критериев [4, 18], поскольку изначально определяет продуктивность водоема, в то время как остальные показатели (концентрация кислорода, биомасса фитопланктона, окисляемость и пр.) — производные от ситуации, создаваемой биогенной нагрузкой. Кроме того, наиболее обширные данные, полученные при самых стандартных и рутинных наблюдениях на озерах, — это именно анализы содержания биогенных веществ. Однако существует большая трудность определения трофического статуса водоемов по концентрации биогенов, связанная со значительной сезонной, локальной и зонально-климатической вариативностью их содержания. Например, в загрязненных водоемах содержание азотных форм может падать до аналитического нуля при избытке фосфора и массовом развитии фитопланктона [19, 20], тогда как в чистых олиготрофных водах их концентрация в это же время может быть выше.

При обработке больших массивов данных для большого числа водоемов целесообразно использовать методы многомерной статистики, позволяющие не только избежать путаницы с определением статуса того или иного водоема, но и выявить ключевые показатели эвтрофирования, наиболее информативные в изучаемом регионе. Кроме того, эти методы позволяют избежать привнесения некоторой субъективности исследователя и выявить латентные факторы, влияющие на отнесение объекта классификации к той или иной категории. Например, одному и тому же озеру в зависимости от сезона, специфики конкретного года наблюдений и даже от места отбора проб нередко можно дать различные оценки трофического статуса. Попадание изучаемого водоема наряду с другими в определенную классификационную группу будет означать, что, несмотря на флуктуации показателей, его истинный трофический статус установлен.

Цель данного исследования — классификация по содержанию биогенных веществ и некоторым дополнительным показателям 17-ти озер и 2-х водохранилищ Южного Урала, расположенных в границах Челябинской области, методами многомерного статистического анализа (МСА).

Методика исследования

Для классификации водоемов были использованы следующие показатели: содержание в воде веществ азотной группы (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-), ортофосфатов (HPO_4^{2-}), общего фосфора ($\text{P}_{\text{общ}}$), а также цветность (Pt-Co) и перманганатная окисляемость (ПО). В период с 2002 г. по 2019 г. были обследованы 19 водоемов Южного Урала (рис. 1), в которых стандартными методами отобраны пробы указанных

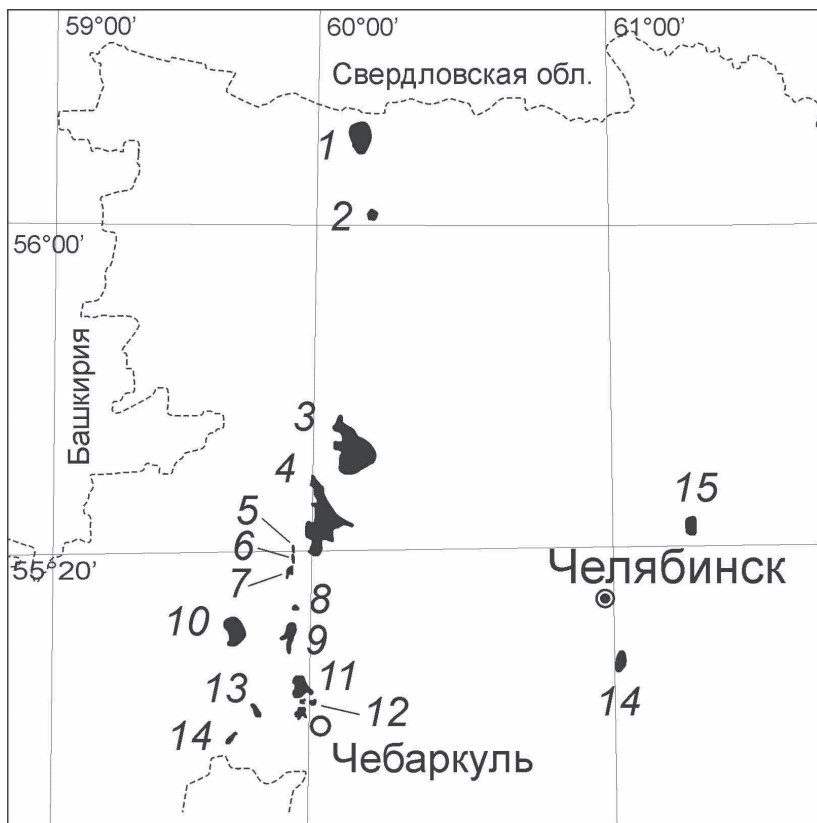


Рис. 1. Карта-схема исследованных водоемов на Южном Урале (север Челябинской области).

Условные обозначения: 1 — Иткуль, 2 — Аракуль, 3 — Увильды, 4 — Аргазинское водохранилище, 5 — Кармакуль, 6 — Сириткуль, 7 — Большой Ишкуль, 8 — Большой Таткуль, 9 — Большое Миассово, 10 — Тургойак, 11 — Большой Кисегач, 12 — Еловое, Малый Теренкуль, Табанкуль, 13 — Ильменское, 14 — Иремельское водохранилище, 15 — Сугояк, 16 — Смолино.

Fig. 1. Map-scheme of the investigated reservoirs in the Southern Urals (north of the Chelyabinsk region).

Symbols: 1 — Itkul, 2 — Arakul, 3 — Uvildy, 4 — Argazinskoye reservoir, 5 — Karmatkul, 6 — Siritkul, 7 — Big Ishkul, 8 — Big Tatkul, 9 — Big Miassovo, 10 — Turgoyak, 11 — Big Kisekach, 12 — Elovoye, Maly Terenkul, Tabankul, 13 — Ilmenskoye, 14 — Iremelskoye reservoir, 15 — Sugoyak, 16 — Smolino.

характеристик. Гидрохимические анализы выполнены в лаборатории Центра коллективного пользования ИГЗ–ИМин УрО РАН (г. Миасс) общепринятыми методами. Исследованные водоемы представляют все основные ландшафтно-климатические и лимнологические зоны Южного Урала (от горно-лесного ландшафта до лесостепи) и демонстрируют разный спектр антропогенной нагрузки: от охраняемых на территории Ильменского государственного заповедника (Большой Ишкуль, Большое Миассово, Сириткуль и др.) и памятников природы (Еловое, Большой Кисегач, Тургояк и др.) до полностью урбанизированных в черте г. Челябинск и его окрестностях (Смолино, Сугояк), служащих в качестве приемников сточных вод (Малый Теренкуль, Табанкуль) или источников водоснабжения городов (водохранилища Аргазинское, Ирмельское). Некоторые из этих озер и водохранилищ сравнительно неплохо изучены, а итоги работ опубликованы [19–26]. Общий объем материала составил 1017 проб, число повторных измерений по разным водоемам колеблется от 3 до 9.

Для нормирования исходного массива статистически разнородных данных и стандартизации в единых терминах разрядов трофности на основе известной шкалы [15] была дана балльная оценка содержанию в пробе каждого гидрохимического показателя, а затем выведен средний балл по каждому из них, соответствующий одной из трофических категорий (табл. 1).

Классификация многих водоемов по трофическому типу может вызвать затруднения из-за существенного разброса оценок по отдельным показателям. В данном случае применены три метода многомерной статистики — кластерный анализ, многомерное шкалирование и анализ соответствий. С помощью первых двух была предпринята попытка найти значимые статистические неоднородности в массиве данных и с их помощью выделить устойчивые сочетания показателей, объединяющих классифицируемые объекты (водоемы) в группы. Третий метод (анализ соответствий) служит для интерпретации выделенных групп и выявления наиболее существенных факторов, определяющих результаты кластеризации [27]. Для технической реализации данных методов было использовано свободно распространяемое программное обеспечение PAST 3.05.

Таблица 1

Усредненная балльная оценка гидрохимических показателей
в озерах и водохранилищах Южного Урала по [15]

The average score of hydrochemical indicators in lakes and reservoirs
of the Southern Urals according to [15]

Водоем	Балльная оценка показателей						
	NH_4^+	NO_2^-	NO_3^-	HPO_4^{2-}	$\text{P}_{\text{общ}}$	$^{\circ}\text{Pt-Co}$	ПО
Аракуль	3	3	1	1	2	2	3
Аргазинское	3	4	5	6	5	4	2
Б. Еланчик	4	3	2	2	3	4	4
Б. Ишкуль	3	3	3	4	4	3	2
Б. Кисегач	3	3	2	2	4	3	5
Б. Миассово	3	3	3	2	4	4	5
Б. Таткуль	4	5	4	3	4	6	7

Водоем	Балльная оценка показателей						
	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	НРО ₄ ²⁻	P _{общ}	°Pt-Co	ПО
Еловое	2	2	2	2	3	2	3
Ильменское	3	4	4	3	4	5	6
Ирмельское	5	3	5	2	4	4	3
Иткуль	3	3	1	2	3	2	2
Карматкуль	3	4	5	2	4	5	5
М. Теренкуль	4	5	3	8	8	5	6
Сириткуль	3	4	4	3	5	5	5
Смолино	3	5	4	3	4	2	3
Сугояк	3	4	3	2	4	2	4
Табанкуль	5	5	4	9	9	8	9
Тургояк	1	2	2	2	2	1	2
Увильды	3	3	3	3	3	2	1

Результаты исследований

Таблица 1 послужила матрицей исходных данных для кластерного анализа и многомерного шкалирования. Первоначальной задачей было выявить, образуют ли водоемы какие-либо компактные группировки по исследуемым показателям. Для этой цели применен кластерный анализ с построением иерархического классификационного дерева. Использован алгоритм кластеризации методом Варда, поскольку он дает хорошие результаты при работе с перекрывающимися кластерами. В качестве метрики использован процент несогласия, широко применяемый в психологии, социологии, археологии, генетике и других областях для работы с категориальными данными: $\rho(X^{(i)}, Y^{(i)}) = \frac{1}{k} \sum_{s=1}^k I[X_s^{(i)} \neq Y_s^{(i)}]$, где $X^{(i)}$ и $Y^{(i)}$ — сравниваемые значения признака, k — количество сравниваемых значений, I — количество несовпадающих значений признака [28].

Итоги кластерного анализа показаны на рис. 2. Анализ расстояний пошагового объединения объектов в кластеры показывает, что иерархическое дерево следует «обрезать» на уровне 3-х кластеров. В итоге были получены следующие три группы водоемов, объединенных по величине гидрохимических и гидрофизических показателей (ГП):

1. Тургояк, Еловое, Большой Еланчик, Иткуль, Аракуль, Увильды, Ирмельское водохранилище;

2. Большое Миассово, Большой Кисегач, Большой Ишкуль, Карматкуль, Сириткуль, Сугояк, Ильменское озеро, Аргазинское водохранилище;

3. Большой Таткуль, Табанкуль, Смолино, Малый Теренкуль.

Для исследования полученной классификационной структуры и выявления латентных факторов, определяющих сходство водоемов по ГП, был применен анализ соответствий (АС) и многомерное шкалирование (МШ).

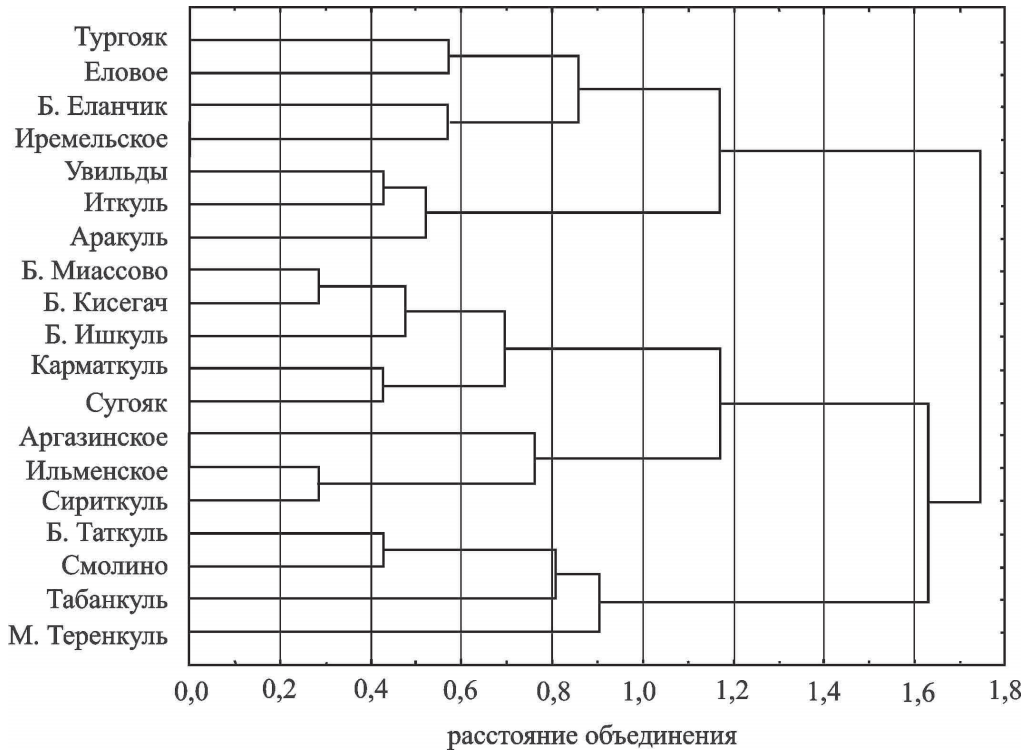


Рис. 2. Дендрограмма результатов иерархического кластерного анализа данных табл. 2.

Fig. 2. Dendrogram of the results of the hierarchical cluster analysis of table 2.

Для того, чтобы понять, какие факторы приводят к наблюдаемой структуре, был использован простой корреспондентный анализ соответствий (simple correspondence analysis), в котором данные не подгоняются под какие-либо статистические модели, а заменяются интерпретацией их графического представления [27]. В данном случае нас интересует интерпретация результатов кластерного анализа, а именно: причины разделения озер на три основных кластера. Для этого отдельные диапазоны ГП были условно обозначены согласно шкале [15]: олиготрофные — О, мезотрофные — М, эвтрофные — Э (табл. 2). Таким образом, если бы какая-то группа водоемов при дальнейшем анализе попала в область «олиготрофных» признаков, это бы означало, что их можно определить как олиготрофные и т.д. Для трех выявленных кластеров (групп водоемов) была составлена карта соответствий — таблица абсолютных частот балльных оценок ГП, основанная на упомянутой шкале трофности. Например (табл. 2), для олиготрофных водоемов наблюдается диапазон содержания аммонийного азота от 0 до 0,1 мг/дм³, который встретился два раза в группе 1 и ни разу в группах 2 и 3. Содержание ионов аммония (0,1—0,3), характерное для класса мезотрофных водоемов, наблюдалось в 4, 8 и 3-х озерах из кластеров с теми же номерами.

Полученная таблица сопряженности была обработана методом простого АС. Найденное графическое решение представлено на рис. 3. Поскольку два измерения объясняют 100% инерции, двумерное решение является исчерпывающим. Рассмотрим распределение трех групп водоемов в пространстве ГП, предварительно интерпретировав оси.

Таблица 2

Таблица абсолютных частот признаков (балльные оценки содержания ГП)
в 3 группах водоемов, выделенных кластерным анализом
Table of absolute frequencies of features (scores by hydrochemical data)
in 3 groups of water bodies identified by cluster analysis

Показатель / группа	Уровень содержания		
	олиготрофный	мезотрофный	эвтрофный
аммоний / 1	2	4	1
нитриты / 1	2	5	0
нитраты / 1	5	1	1
ортофосфаты / 1	6	1	0
общий фосфор / 1	2	5	0
цветность / 1	3	4	0
окисляемость / 1	3	4	0
аммоний / 2	0	8	0
нитриты / 2	0	8	0
нитраты / 2	0	5	2
ортофосфаты / 2	4	3	1
общий фосфор / 2	0	6	2
цветность / 2	1	4	3
окисляемость / 2	2	1	5
аммоний / 3	0	3	1
нитриты / 3	0	0	4
нитраты / 3	0	4	0
ортофосфаты / 3	0	2	2
общий фосфор / 3	0	2	2
цветность / 3	1	0	3
окисляемость / 3	0	1	3

Из табл. 2 видно, что мы имеем 21 значение семи признаков (ГП, табл. 1). Следовательно, для интерпретации осей целесообразно рассматривать точки значений признаков, абсолютный вклад которых в инерцию не менее $1/21 = 0,048$. Для оси 1 (рис. 3), объясняющей основную долю инерции (73,3%), наибольший вклад в инерцию оси дают точки:

— отрицательное направление

нитраты О, фосфаты О, нитриты О, аммоний О;

— положительное направление

нитриты Э, цветность Э, ПОЭ, нитраты М, фосфаты Э, фосфор Э.

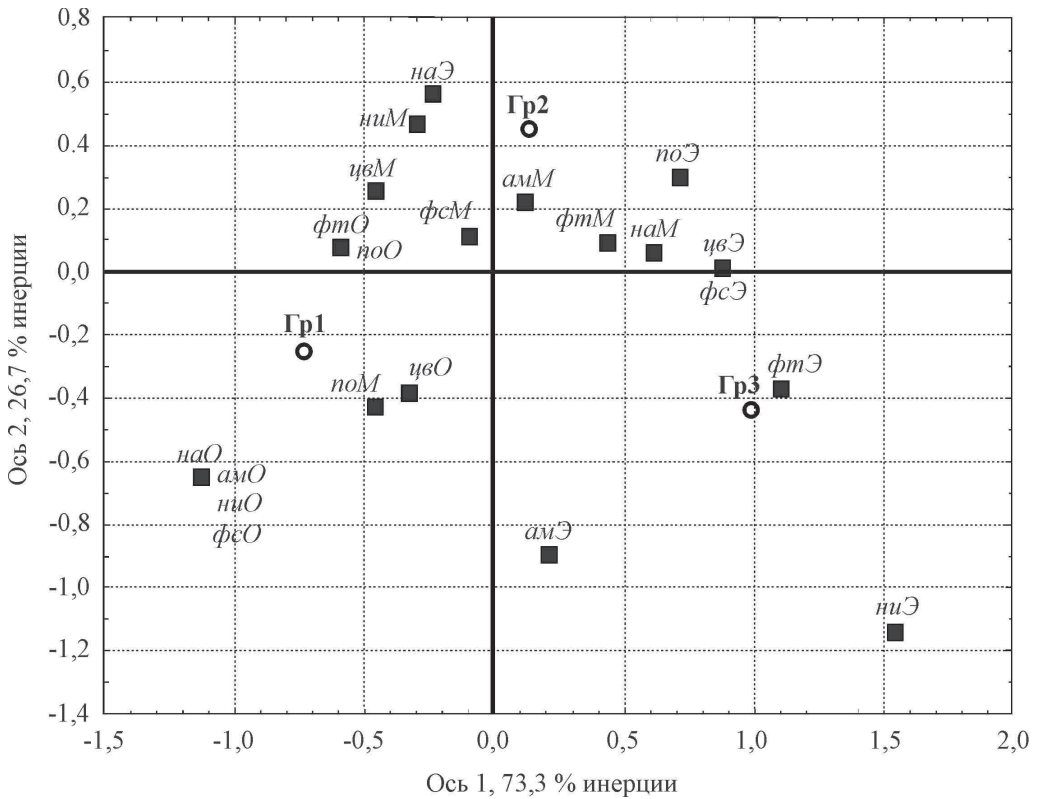


Рис. 3. Графическое решение таблицы 3 в пространстве двух главных осей, асимметричная карта (анализ соответствий).

Условные обозначения: *ам* — аммоний, *ни* — нитриты, *на* — нитраты, *фт* — ортофосфаты, *фс* — общий фосфор, *цв* — цветность, *по* — перманганатная окисляемость, *О* — олиготрофное, *М* — мезотрофное, *Э* — эвтрофное содержание (по шкале [15]).

Fig. 3. Graphical solution of Table 3 in the space of two main axes, asymmetric map (correspondence analysis).

Symbols: *ам* — ammonium, *ни* — nitrites, *на* — nitrates, *фт* — orthophosphates, *фс* — total phosphorus, *цв* — color, *по* — permanganate oxidizability, *О* — oligotrophic, *М* — mesotrophic, *Э* — eutrophic concentration (according to the scale [15]).

Горизонтальную ось 1 можно обозначить, исходя из значения главных точек, как «олиготрофное содержание нитратов» — «эвтрофное содержание нитритов». Аналогично на «олиготрофные» и «эвтрофные» разделяются на оси и точки остальных ГП. Данная ось разделяет водоемы по группам «олиготрофные» и «эвтрофные»: точка группы 1 находится в отрицательной стороне пространства характеристик с признаками олиготрофии — наиболее низким содержанием всех ГП, точка группы 3 — в положительной стороне с противоположными по значению признаками. Точка группы 2 лежит вблизи центра оси 1, следовательно, для

нее не характерны атрибуты ни положительного, ни отрицательного ее полюсов. Она расположена рядом с точками ГП, имеющими преимущественно «мезотрофные» значения. Итак, ось 1 в двухмерной системе координат АС по существу представляет собой аналог шкалы олиготрофно-эвтрофной сукцессии, где группы 1, 2 и 3 представляют олиготрофные, мезотрофные и эвтрофные водоемы. Наибольшее значение для распределения групп в пространстве АС имеют биогенные вещества азотной группы, а именно нитриты и нитраты, а вовсе не фосфор и фосфаты, как можно было ожидать, исходя из традиционных представлений. Немаловажное значение для эвтрофной части шкалы имеют также показатели концентрации органического вещества: цветность и перманганатная окисляемость. Высокое содержание растворенной органики оказывается существенным фактором для отнесения водоемов к эвтрофному типу.

Для второстепенной оси 2 (26,7 %) основной вклад в инерцию вносят точки:

— отрицательное направление

нитриты Э (0,265), нитраты О (0,107), аммоний Э (0,081);

— положительное направление

нитриты М (0,142).

Если измерение 1 разводит группы 1 и 3 олиготрофных и эвтрофных водоемов, то измерение 2 дополнительно отделяет от них группу 2, для которой наиболее существенной характеристикой становится мезотрофная концентрация нитритов и максимальное удаление в пространстве АС от олиготрофных и эвтрофных концентраций веществ азотной группы. Вполне естественно охарактеризовать группу 2 как кластер мезотрофных водоемов. Следует подчеркнуть, что для обоих измерений АС из всех ГП содержание нитритов является основным определяющим признаком, «разделяющим» анализируемые группы водоемов. Однако концентрация в воде фосфатов и общего фосфора не вносит никакого заметного вклада в формирование анализируемой классификационной структуры.

Перейдем к анализу результатов многомерного шкалирования (рис. 4). Распределение водоемов в пространстве МШ вдоль шкалы 1, согласно итогам АС, хорошо согласуется с их трофическим статусом — в левой части оси находятся озера из 3 группы, которую мы определили как эвтрофную, а в правой — из 1 группы олиготрофных водоемов, т.е. отрицательные значения соответствуют высокой степени эвтрофии, положительные — олиготрофии.

Водоемы, сконцентрированные возле нулевой отметки, принадлежат к группе мезотрофных. Сложнее интерпретировать шкалу 2. По градиенту шкалы 2 рядом расположены совершенно разнородные озера — по географическому положению, морфометрии, минерализации вод и т.д. Тем не менее, определенную закономерность все же можно обнаружить: в положительной части шкалы 2 расположены озера с ярко выраженным трофическим статусом — характерно олиготрофные и эвтрофные, тогда как ниже 0 — водоемы, менее определенно принадлежащие к своей категории. Чем более четко выражен трофический тип, тем выше по шкале 2 расположен водоем. Так, наиболее характерные представители — Табанкуль (политрофный), Тургояк, Еловое, Аракуль (типично олиготрофные и ультраолиготрофные), тогда как, например, Б. Миассово и Б. Кисегач имеют неустойчивый

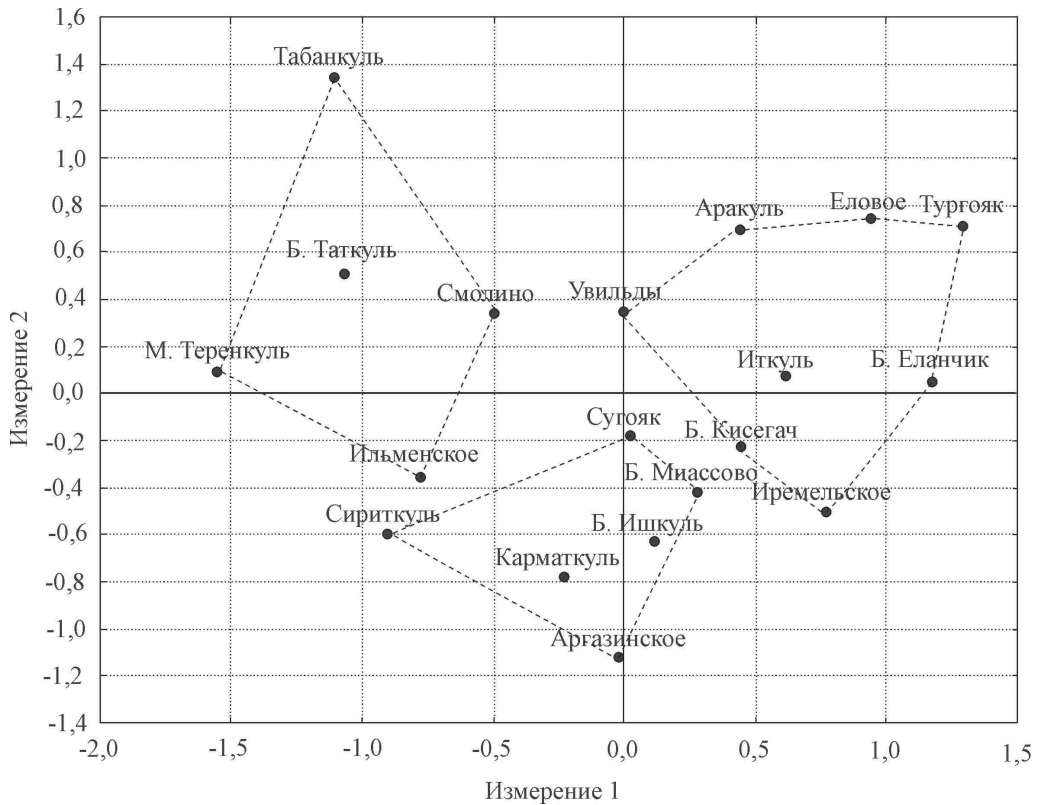


Рис. 4. Диаграмма результатов многомерного шкалирования данных табл. 2.

Fig. 4. Chart of results of multivariate scaling of table 2.

трофический тип, колеблющийся от олиго- до мезотрофии. Такой водоем как Аргазинское водохранилище обладает наиболее неопределенным статусом [23]. Таким образом, шкалу 1 мы интерпретируем как положение водоема на шкале олиготрофно-эвтрофной сукцессии, а шкалу 2 — как «определенность» этого положения.

Заключение

В работе выполнена классификация 19 важнейших водоемов Южного Урала по трофическому типу по комплексу из 7 гидрохимических показателей. Во всех изученных водоемах наблюдались значительные сезонные, пространственные и многолетние колебания содержания основных ГП. Для корректного анализа большого массива данных и исключения субъективного фактора в выявлении трофического статуса была выполнена его обработка методами многомерного статистического анализа. С помощью кластерного анализа и многомерного шкалирования были выделены устойчивые сочетания гидрохимических показателей,

объединяющих классифицируемые объекты (водоемы) в группы, а метод анализа соответствий использовался для интерпретации выделенных групп и выявления наиболее существенных факторов, определяющих результаты кластеризации.

В результате 19 водоемов Южного Урала по комплексу из 7 биопродукционно-гидрохимических показателей были разбиты на 3 квазиоднородных группы (района). С помощью анализа соответствий эти группы интерпретированы как трофические типы водоемов (олиго-, мезо- и эвтрофный). К олиготрофным относятся озера Аракуль, Большой Еланчик, Еловое, Иткуль, Тургояк, Увильды и Иремельское водохранилище, мезотрофным — озера Большой Ишкуль, Большой Кисегач, Большое Миассово, Ильменское, Карматкуль, Сириткуль, Сугояк и Аргазинское водохранилище, эвтрофным — Большой Таткуль, Малый Теренкуль, Смолино, Табанкуль. Некоторые водоемы из перечисленных имеют переходный трофический статус.

Среди основных гидрохимических показателей наибольшее значение для трофической классификации южноуральских водоемов имеют вещества азотной группы, а среди них — содержание в воде нитритов.

Список литературы

1. Naumann E. The Scope and Chief Problems of Regional Limnology // *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 1929. Vol. 21. 423 p.
2. Naumann E. Limnologische Terminologie // *Abderhalden's Handbuch biol. Arbeitsmeth.* 1931. Bd. 9. № 8. 776 p.
3. Thienemann A. Die Binnengewässer Mitteleuropas: Eine limnologische Einführung. Stuttgart: E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 1926. 255 p.
4. Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ: Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
5. Китаев С. П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М.: Наука, 1984. 130 с.
6. Åberg B., Rhode W. Über die milieufaktoren in einigen südschwedischen seen // *Symb. Bot. Ups.* 1942. Bd. 5. № 3. 256 p.
7. Beeton A. M., Edmonson W. T. The Eutrophication Problem // *J. Fish. Res.* 1972. Vol. 29. P. 673—682. doi: 10.1139/f72-113.
8. Berg K. A. J., Petersen I. B. C. Studies on the Humic Acid Lake Gribso. Witham: Fossil Books, 1956. 273 p.
9. Canfield D. E. Jr., Langeland K. A., Maceina M. J. et al. Trophic state classification of lakes with aquatic macrophytes // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1983. Vol. 40. P. 1713—1718.
10. Carlson R. E. A trophic state index for lakes // *Limnology and Oceanography.* 1977. Vol. 22. P. 361—369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
11. Hutchinson G.E. A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, physics and chemistry. New York: Wiley, 1957. 1015 p.
12. Ruttner F. Grundriss der Limnologie (Hydrobiologie des Süßwassers). Kerkwerke: Backhuys Biological Books, 1952. 232 p.
13. Vollenweider R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication // *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 1976. Vol. 33. P. 53—83.
14. Бульон В. В. Взаимосвязь между содержанием хлорофилла «а» в планктоне и прозрачностью воды по диску Секки // Доклады АН СССР. 1977. Т. 236. № 2. С. 505—508.
15. Оксийок О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П. и др. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // *Гидробиологический журнал.* 1993. Т. 29. № 4. С. 62—77.

16. Йоргенсен С. Э. Управление озерными системами. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.
17. Андреева М. А. Озера Среднего и Южного Урала: Гидрологический режим и влияние на него атмосферной циркуляции. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд-во, 1973. 272 с.
18. Баранов И. В. Основы биопродукционной гидрохимии. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 112 с.
19. Рогозин А. Г. Зоопланктон гипертрофного водоема на примере озера Табанкуль (Южный Урал): условия существования // Известия Челябинского научного центра РАН. 2006. Вып. 3. С. 73—77.
20. Рогозин А. Г. Зоопланктон озера Малый Теренкуль (Южный Урал) // Известия Челябинского научного центра. 2009. Вып. 3. С. 29—33.
21. Захаров С. Г. Озеро Большое Кисегач. Челябинск: Челябинский дом печати, 2002. 48 с.
22. Захаров С. Г. Озеро Еловое. Челябинск: Челябинский дом печати, 2002. 26 с.
23. Рогозин А. Г. Зоопланктон Аргазинского водохранилища (Южный Урал) и его многолетние изменения // Биология внутренних вод. 2013. № 2. С. 25—33. doi: 10.1134/S1995082913020077.
24. Рогозин А. Г. Экологические проблемы Кисегач-Миассовской озерной системы (Южный Урал) // Проблемы региональной экологии. 2014. № 5. С. 20—24.
25. Ткачев В. А., Рогозин А. Г., Гаврилкина С. В. и др. Экология озера Тургояк / Под ред. В. А. Ткачева, А. Г. Рогозина. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 1998. 154 с.
26. Рогозин А. Г., Ткачев В. А., Гаврилкина С. В. и др. Экология озера Большое Миассово / Под ред. А. Г. Рогозина, В. А. Ткачева. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2000. 318 с.
27. Greenacre M. J. Theory and Applications of Correspondence Analysis. London: Academic Press, 1984. 364 p.
28. Everitt B. S., Landau S., Leese M. et al. Cluster Analysis. London: John Wiley and Sons, 2011. 348 p.

References

1. Naumann E. The Scope and chief problems of regional limnology. *Int. Revue ges. Hydrobiol.* 1929; 21: 423 p.
2. Naumann E. Limnologische terminologie. *Abderhalden's Handbuch biol. Arbeitsmeth.* 1931; 9(8): 776 p.
3. Thienemann A. Die Binnengewässer Mitteleuropas: Eine limnologische Einführung. Stuttgart: E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 1926: 255 p.
4. Datsenko Yu.S. *Ehvtrofirovaniye vodohranilishch = Eutrophication of reservoirs.* Moscow: GEOS, 2007: 252 p. (In Russ.).
5. Kitaev S. P. *Ehkolozhicheskie osnovy bioproduktivnosti ozer raznykh prirodnykh zon = Ecological bases of lake bioproductivity of a different natural areas.* Moscow: Nauka, 1984: 130 p. (In Russ.).
6. Åberg B. Über die milieufaktoren in einigen südschwedischen seen. *Symb. Bot. Ups.* 1942; 5(3): 256 p.
7. Beeton A. M., Edmonson W. T. The Eutrophication Problem. *J. Fish. Res.* 1972; (29): 673—682. doi: 10.1139/f72-113.
8. Berg K. A. J., Petersen I. B. C. Studies on the Humic Acid Lake Gribso. Witham: Fossil Books, 1956: 273 p.
9. Canfield Jr. D. E., Langeland K. A., Maceina M. J. et al. Trophic State Classification of Lakes with Aquatic Macrophytes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1983; 40: 1713—1718.
10. Carlson R. E. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography.* 1977; 22: 361—369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361.
11. Hutchinson G. E. A Treatise on Limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. New York: Wiley, 1957: 1015 p.
12. Ruttner F. Grundriss der Limnologie (Hydrobiologie des Süßwassers). Kerkwerve: Backhuys Biological Books, 1952: 232 p.
13. Vollenweider R. A. Advances in Defining Critical Loading Levels for Phosphorus in Lake Eutrophication. *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 1976; (33):53—83.
14. Bul'on V.V. Correlation Between Chlorophyll "a" Concentration in Plankton and Water Transparency According to the Secchi Disc. *Doklady Akademii Nauk SSSR = Doklady of the Academy of Sciences of the U.S.S.R.* 1977; 236(2): (505—508). (In Russ.).

15. Oksiyuk O. P., Zhukinskij V. N., Braginskij L. P. et al. Integrated Ecological Classification of Surface Water Quality. *Hydrobiol. J.* 1993; 29(4): (62—77). (In Russ.).
16. Jørgensen S. E. Lake Management. Oxford — New York — Toronto — Sydney — Paris — Frankfurt: Pergamon Press, 1980: 160 p.
17. Andreeva M. A. *Ozera Srednego i Yuzhnogo Urala = Lakes of the Middle and Southern Urals*. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo, 1973: 272 p. (In Russ.).
18. Baranov I. V. *Osnovy bioprodukcionnoj gidrohimii = Bases of bioproduktive hydrochemistry*. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1982: 112 p. (In Russ.).
19. Rogozin A. G. Zooplankton in a hypertrophic lake (On an example of Lake Tabankul (Southern Urals): Conditions of existence. *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra = Proceedings of the Chelyabinsk scientific center*. 2006; (3): (73—77). (In Russ.).
20. Rogozin A. G. Zooplankton of Lake Malyj Terenkul' (Southern Urals). *Izvestiya Chelyabinskogo nauchnogo centra = Proceedings of the Chelyabinsk scientific center*. 2009; (3): (29—33). (In Russ.).
21. Zakharov S. G. *Ozero Bol'shoj Kisegach = Lake Bol'shoj Kisegach*. Chelyabinsk: Chelyabinskij dom pečati, 2002: 48 p. (In Russ.).
22. Zakharov S. G. *Ozero Elovoe = Lake Elovoe*. Chelyabinsk: Chelyabinskij dom pečati, 2002: 26 p. (In Russ.).
23. Rogozin A. G. Zooplankton of the Agazi Reservoir (Southern Urals, Russia) and its long-term changes. *Inland Water Biology*. 2013;(2): (25—33). doi: 10.1134/S1995082913020077.
24. Rogozin A. G. Ekhologicheskie problemy Kisegach-Miassovskoj ozernoj sistemy (Yuzhnyj Ural) = Ecological problems of Kisegach–Miassovo lake system (Southern Urals). *Problemy regional'noj ehkologii = Problems of regional ecology*. 2014; (5): (20—24). (In Russ.).
25. *Ehkologiya ozera Turgoyak = Ecology of Lake Turgoyak*. Miass: IGZ UrO RAN Publ., 1998: 154 p. (In Russ.).
26. *Ehkologiya ozera Bol'shoe Miassovo = Ecology of Lake Bol'shoe Miassovo*. Miass: IGZ UrO RAN Publ., 2000: 318 p. (In Russ.).
27. Greenacre M. J. *Theory and applications of correspondence analysis*. London: Academic Press, 1984: 364 p.
28. Everitt B. S., Landau S., Leese M. et al. *Cluster Analysis*. London: John Wiley and Sons, 2011: 348 p.

Сведения об авторе

Александр Генрихович Рогозин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии РАН, rogozin57@gmail.com.

Information about author

Alexander Genrikhovich Rogozin, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, South Ural Federal Scientific Center for Mineralogy and Geoecology of the Russian Academy of Sciences, rogozin57@gmail.com.

Статья поступила 21.06.2023

Принята к печати после доработки 19.10.2023

The article was received on 21.06.2023

The article was accepted after revision on 19.10.2023