

УДК 556.55

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЫБРОСОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛЫХ ОЗЕР КАРЕЛИИ¹

© 2025 г. В. Ю. Крылова^а, *, Н. В. Игнатьева^а

^аИнститут озераведения РАН – обособленное структурное подразделение Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, 196105 Россия

*e-mail: krylova.v@sprcras.ru

Поступила в редакцию 30.03.2024 г.

После доработки 07.05.2024 г.

Принята к публикации 25.10.2024 г.

На основе статистических оценок составлена гидрохимическая характеристика малых озер, типичных для различных ландшафтов Республики Карелии. Тестовая выборка, подлежащая исследованию, сформирована на основе гидрохимических данных относительно 223 наиболее изученных малых озер Карелии, разделенных на группы на основе их принадлежности тому или иному ландшафту. Оценена возможность выявления атипичных (аномальных) для определенной территории, в том числе уникальных, озер путем применения статистических критериев идентификации выбросов при анализе гидрохимических данных. Поиск аномальных значений проводился классическими методами статистического анализа, среди которых квантильный анализ (ящичковая диаграмма) и статистические критерии поиска выбросов Шовене и Рошера (Томпсона). Оценена эффективность применения данных методов для выявления аномалий. Выполнен экспертный анализ полученной выборки озер с аномальными значениями гидрохимических параметров с целью выявления характера и причин аномалий, а также на предмет уникальности озер. Намечены пути дальнейших исследований возможности использования методов математической статистики для поиска аномалий, а также разработки критериев уникальности озер с позиции гидрохимии.

Ключевые слова: озерная экосистема, гидрохимия озер, уникальные озера, поиск аномалий, статистические выбросы.

DOI: 10.31857/S0321059625030065 EDN: SYOBRB

ВВЕДЕНИЕ

По современным данным, общее число озер на Земле достигает 304 млн, при этом большая их часть имеет площадь зеркала $< 1 \text{ км}^2$ [15]. В связи с неравномерным распределением озер по поверхности суши выделяют так называемые озерные районы, где на относительно небольшой площади, ограниченной одной или несколькими ландшафтными единицами, расположены сотни озер. Один из таких районов – Республика Карелия. Сформировавшиеся и эволюционирующие в схожих природных условиях озера, как правило, обладают значитель-

ным сходством, хотя абсолютно одинаковых по своим характеристикам озерных экосистем в природе нет. Однако в каждой совокупности обычно существуют озера, заметно выделяющиеся по ряду характеристик и свойств. Эти озера отличаются экстремальными значениями тех или иных параметров, выходящими за границы диапазонов, характерных для большинства озер данной совокупности, т. е. озер, типичных для данной территории. При этом существует вероятность того, что некоторые из атипичных (или аномальных) для данной территории озер могут быть отнесены к категории уникальных. Еще недавно единственным способом определения уникальности была экспертная оценка. К недостаткам такой оценки можно отнести действие субъективного фактора, а также трудоемкость и подчас невозможность проанализировать большой массив данных. Поэтому в последние годы были сделаны попытки применения статисти-

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН (тема FFZF-2024-0001 “Экосистемы Ладожского озера, водоемов его бассейна и прилегающих территорий под воздействием природных и антропогенных факторов на фоне климатических изменений”).

ческого подхода при анализе абиотических параметров озер, в частности – их морфометрических характеристик [3, 4, 9–12]. Полученные результаты свидетельствуют в пользу применения статистических методов и перспективности дальнейшего развития этого направления в выявлении атипичных, в том числе уникальных, озер. При этом авторами публикаций [3, 4, 10, 11] отмечено, что аномалии по морфометрическим параметрам часто сопровождаются аномалиями по ряду других характеристик, в частности гидробиологических и гидрохимических, более подверженных внешним воздействиям, чем морфометрические.

Повышенный интерес к выявлению и изучению атипичных озер, помимо чисто научного аспекта в рамках комплексных лимнологических исследований, имеет социальные корни в связи с необходимостью сохранения и особой охраны данной категории озер, что может быть реализовано в результате придания им статуса особо охраняемых природных территорий (ООПТ). В настоящее время в данном вопросе эксперты руководствуются в основном наличием красно-книжной флоры и фауны, при этом гидрохимические характеристики учитываются редко.

Целью данного исследования была оценка возможности применения статистического подхода к анализу гидрохимических параметров для составления гидрохимической характеристики озер, типичных для различных ландшафтов, а также для выявления атипичных, в том числе уникальных, озерных экосистем. С точки зрения методики математически задача выявления атипичных озер сводится к поиску аномалий. Это можно сделать с помощью статистических методов определения выбросов в исходной выборке. В данном исследовании подлежащая анализу репрезентативная выборка водных объектов строилась на основе малых озер Республики Карелии, разделенных на группы на основе их ландшафтной принадлежности. Для достижения поставленной цели было необходимо:

сформировать массив данных гидрохимических параметров малых озер Карелии;

на основе статистических оценок составить гидрохимическую характеристику озер, типичных для различных ландшафтов Карелии;

исследовать сформированный массив гидрохимических данных на наличие аномальных значений с помощью графических методов и классических статистических критериев обнаружения выбросов;

проанализировать полученную выборку озер с аномальными значениями гидрохимических параметров с целью возможного выявления характера и причин аномалий, а также на предмет уникальности озер.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Республика Карелия, расположенная на северо-западе России в пределах северо-западной части северной и средней тайги, насчитывает ~ 60 тыс. озер, самые большие из них – Ладожское и Онежское. За счет нахождения на Балтийском кристаллическом щите, в зоне умеренно холодного климата с признаками морского эта группа озер с большой вероятностью должна иметь схожие характеристики. Следовательно, аномалии с большой вероятностью будут существенно отличаться от большинства озер данной группы.

Для территории Республики Карелии характерны два зональных типа ландшафта – лесотундровый и северотаежный, а также среднетаежный. В основу районирования исследуемой территории с целью выделения озер, расположенных в схожих геохимических ландшафтах, была положена карта А.Г. Исаченко [5]. На рис. 1 представлена оцифрованная карта ландшафтов Карелии, точками отмечены исследуемые озера. На территории лесотундрового и северотаежного ландшафтов, согласно А.Г. Исаченко, расположены геохимические ландшафты 32 и 35, среднетаежного – геохимические ландшафты 37, 33, 10. Данные ландшафты представляют собой возвышенные денудационно-аккумулятивные равнины с умеренным водообменом на рыхлых отложениях, подстилаемых консолидированными породами лесотундрового и северотаежного ландшафтов (35), среднетаежного ландшафта (37), а также низменные равнины с замедленным водообменом на органогенных породах лесотундрового и северотаежного ландшафтов (32), среднетаежного ландшафта (33) и на рыхлых четвертичных отложениях среднетаежного ландшафта (10).

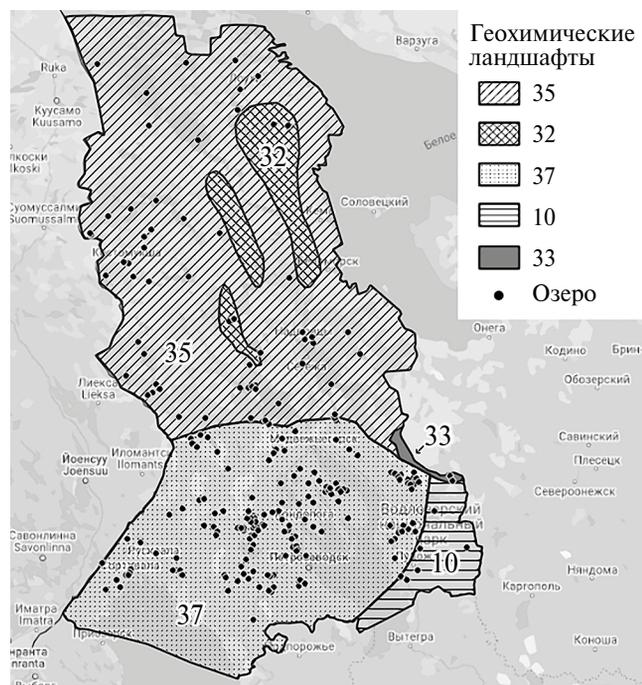


Рис. 1. Оцифрованная картосхема геохимических ландшафтов Республики Карелии, по А.Г. Исаченко [5], и расположение исследуемых озер.

Современный рельеф Карелии сформирован под действием тектонических движений (разломы земной коры, пересекающие Карелию с северо-запада на юго-восток) и ледниковой эрозии. В регионе преобладают ледниковые формы рельефа (сельги, выходы горных пород), также встречаются моренные и озерно-ледниковые песчаные равнины, зандровые равнины и озово-камовые комплексы [13].

По происхождению выделяются два типа озерных котловин – тектонические и ледниковые (моренные). Большинство крупных озер региона имеет ледниково-тектоническое происхождение, котловины которых развиты в трещинах и сбросах с ярко выраженными следами ледниковой эрозии [8]. Ледниковые озера имеют средние и небольшие глубины и расположены между моренными грядами и холмами, также встречаются запрудно-речные озера и бессточные озера, представленные лесными и болотными озерами.

Воды озер Карелии имеют низкую минерализацию, средние значения крайне редко >100 мг/л.

Это обусловлено тем, что регион располагается на кристаллическом щите, состоящем из трудно размываемых горных пород (граниты, кристаллические сланцы, гнейсы и др.). Среди анионов доминирует гидрокарбонат-ион, среди катионов – кальций, реже магний и натрий. Поступление минеральных компонентов происходит в результате выщелачивания карбонатов и силикатов из почв и подстилающих пород [8, 13]. По величине водородного показателя рН воды озер Карелии – нейтральные или слабокислые, в редких случаях слабощелочные. Особенностью озерных вод является повышенное содержание железа и марганца и пониженная концентрация фторидов. Из тяжелых металлов повышенные концентрации могут наблюдаться только у меди и цинка.

Большинство крупных озер Карелии – олиготрофные, располагаются они преимущественно на севере региона и в Северном Приладожье. Значительная часть малых озер классифицирована как мезотрофные. Также встречаются акцидотрофные озера, к ним относятся бессточные или малопроточные озера, расположенные у водоразделов.

Массив данных, подлежащих в настоящем исследовании анализу на предмет выявления аномалий гидрохимических характеристик, был сформирован на основе справочника “Озера Карелии” [8], включающего информацию о 225 наиболее изученных озерах региона. Крупнейшие озера Карелии – Ладожское и Онежское – в выборку не включались, поскольку огромные размеры озерных котловин во многом обуславливают совершенно иное протекание в них целого ряда лимнических процессов, что позволяет отнести значительную часть подобных озер к разряду уникальных, не находящихся себе место в ландшафтных классификациях и в ландшафтном районировании [9]. Анализ данных выполнен относительно 223 малых озер, 59 из которых принадлежат лесотундровому и северотаежному ландшафту, 164 – среднетаежному. Как видно из рис. 1, на территории первого из них большая часть озер принадлежит геохимическому ландшафту 35, на территории второго – ландшафту 37. В остальных ландшафтах (10, 32, 33) расположено очень незначительное число

озер – от 2 до 7, поэтому для выполнения статистических оценок озера были сгруппированы на основе зональных типов ландшафта.

Рассматриваемые озера различаются по степени гидрохимической изученности – от данных одноразового определения ограниченного числа параметров до данных многолетних сезонных наблюдений по всему комплексу основных гидрохимических характеристик. Наиболее достоверные результаты получены, естественно, для тех озер, для которых можно было оперировать среднерядовыми среднемноголетними значениями.

Для исследования были взяты значения следующих 16 гидрохимических параметров: рН, цветности, биохимического потребления кислорода в течение 5 сут (БПК₅), химического потребления кислорода (ХПК_{Cr}), концентраций Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, суммы главных ионов (Σ_и), Fe_{общ}, форм главнейших биогенных элементов – P_{общ}, N_{общ}, N_{орг}. В качестве дополнительной информации использованы сведения о морфометрии, биоте и хозяйственном использовании озер.

Наиболее простым статистическим методом определения выбросов в исходной выборке является квантильный анализ, предложенный Дж. Тьюки [17]. Наглядная форма представления результатов квантильного анализа – ящичковая диаграмма (“ящик с усами”). Диаграмма представляет собой прямоугольник, верхняя и нижняя граница которого обозначают первый ($x_{0.25}$) и третий ($x_{0.75}$) квантили. Разность $Q = x_{0.25} - x_{0.75}$ называется интерквартильным расстоянием. Длине “усов”, отходящих от верхней и нижней границ прямоугольника, соответствует 25% максимальных и 25% минимальных значений характеристики. Горизонтальная линия внутри ящика соответствует медиане ($x_{0.50}$), характеризующей центр распределения. Для нормально распределенных выборок медиана находится посередине, в случае если она смещена относительно центра прямоугольника, это говорит о наличии асимметрии в исходной выборке. При нормальном распределении выборки выполняется следующее соотношение

$$Q = 1.34\sigma, \tag{1}$$

где Q – интерквартильное расстояние, σ – среднеквадратическое отклонение.

Прямые линии, перпендикулярные к “усам”, – так называемые барьеры. Точки, находящиеся за ними и резко выделяющиеся из остальной совокупности, называются выбросами. Внутренние барьеры находятся на расстоянии $1.5Q$, от верхней и нижней границ ящика, внешние – на расстоянии $3Q$.

Для положительных аномалий выполняется условие: $-x_{\text{выб}} > x_{0.75} + 1.5Q$, для отрицательных: $-x_{\text{выб}} < x_{0.25} - 1.5Q$. В случае нормального распределения выборки в диапазоне $\pm 1.5Q$ содержится 99% значений выборки, в диапазоне $\pm 3Q$ – 99.9997%.

В анализируемой выборке распределения вероятности практически по всем параметрам, кроме рН, не подчиняются нормальному закону распределения, поэтому были приведены к нему с помощью преобразования Бокса–Кокса, для K⁺ дополнительно применялось преобразование Йео–Джонсона. Для нормально распределенных выборок можно применить критерии, такие как 3-сигма, Смирнова–Граббса, Хоглина–Иглевича, Титьена–Мура, Шовене, Ирвина и метод Томпсона (критерий Рошера). На основе результатов предыдущих исследований [4], в ходе которых анализировались морфометрические характеристики вулканических озер, из всего множества статистических критериев были выбраны критерии Шовене и Рошера (Томпсона). При этом критерий Шовене показал неудовлетворительный результат, а оптимальным с точки зрения экспертной оценки оказался критерий Рошера. Тем не менее, поскольку оценка гидрохимических характеристик отличается от оценок морфометрических параметров, были использованы оба критерия – Шовене и Рошера (Томпсона).

Критерий Шовене предназначен для сравнения элемента выборки x_i объемом n с табличным критическим значением K^* [6]. Если $K > K^*$, то значение x_i признается выбросом. Статистика критерия Шовене имеет вид:

$$K = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}, \tag{2}$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; n – число наблюдений;
 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – выборочное среднее значение,
 $s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ – выборочное стандартное отклонение.

Критерий Рошера (Томпсона) [16] основан на статистике:

$$T_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}. \quad (3)$$

Критическое значение критерия Рошера (Томпсона) находится согласно формуле:

$$T = \sqrt{\frac{(n-1)t_{1-\alpha/2, n-2}^2}{t_{1-\alpha/2, n-2}^2 + n - 2}}, \quad (4)$$

где n – число наблюдений; $t_{1-\alpha/2, n-2}^2$ – квартиль распределения Стьюдента при уровне значимости $\alpha = 0.05$ и числе степеней свободы $\nu = n - 2$. Если эмпирическое значение критерия больше критического, то наблюдение признается выбросом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Статистические оценки гидрохимических параметров малых озер Карелии двух рассматриваемых ландшафтов приведены в табл. 1, 2. Как можно заметить, практически для всех характеристик распределение вероятности имеет левостороннюю (положительную) асимметрию, т. е. максимум смещен к началу координат. Это означает, что в исследуемой выборке в целом озера имеют схожие значения гидрохимических характеристик, но есть озера, значения гидрохимических характеристик которых сильно превышают средние значения соответствующих параметров. Независимо от ландшафта, наибольший разброс данных относительно среднего значения отмечается по следующим параметрам – цветности, HCO_3^- , Σ_n , $P_{\text{общ}}$.

Если говорить о типичных для двух ландшафтных зон значениях гидрохимических показателей в озерах и их различиях, обусловленных природными факторами, то из рассмотрения следует исключить пять озер лесотундрового и северотаежного ландшафта, испытывающих

сильное антропогенное воздействие (антропогенно трансформированных озер), в результате которого в озерах Поппалиярви (Попали-ярви), Койвас и Кенто обнаруживаются очень высокие концентрации ионов калия и сульфатов (K^+ – 16.9–49.6 мг/л; SO_4^{2-} – 27.5–73.6 мг/л), в оз. Травяном (б/н) – фосфора, натрия и хлоридов ($P_{\text{общ}}$ – 1250 мкг/л; Na^+ – 13.6 мг/л, Cl^- – 30.5 мг/л), в оз. Ругозеро – азота ($N_{\text{общ}}$ – 3.87 мг/л). Статистические оценки параметров без учета этих пяти озер также включены в табл. 1.

Построение ящичковых диаграмм для первичной оценки исходных выборок на наличие выбросов выявило 26 озер (выбросов), что составляет ~12% общего числа озер исследованной выборки. Аналогичная процедура без учета пяти вышеупомянутых озер, испытывающих сильное антропогенное воздействие, выявила 16 выбросов, 13 из которых попали в число 26 озер, выявленных при анализе всего массива данных, а 3 озера (Пайкъярви (Пайк-ярви), Мунозеро и Мурмозеро) – только при расчете без учета антропогенно трансформированных озер. Полный список выбросов представлен в табл. 3. Первичный экспертный анализ, выполненный на основе имеющейся относительно этих озер информации, показал, что 3 из них – Шавань, Большое Черное (б/н) и Гангозеро – следует исключить из числа атипичных для данной выборки озер (выбросов) из-за недостаточного объема имеющейся гидрохимической информации. Так, оз. Шавань попало в выбросы из-за аномально низкого значения БПК_5 (0.23 мг O_2 /л), однако имеющиеся первичные данные за два года наблюдений относятся только к осеннему периоду, для которого характерно снижение значений данного показателя. Подобная ситуация возникает и с оз. Большим Черным (б/н), для которого было выявлено аномально высокое значение рН, равное 9. Это маленькое, мелководное, высокопродуктивное (эвтрофное) озеро, отбор проб на котором был выполнен одноразово – летом 1964 г. Поэтому вполне закономерно, что вследствие активного фотосинтеза в период наибольшей интенсивности вегетационных процессов значение рН могло быть достаточно высоким. Имеющиеся для оз. Гангозеро данные также являются результатом одноразового отбора проб в осенний период. При этом при анализе всего массива данных аномалия выявлена по низкому

Таблица 1. Статистические оценки гидрохимических параметров малых озер лесотундрового и северотаежного ландшафтов Карелии (геохимические ландшафты 32 и 35) (в скобках – значения параметров без учета антропогенно трансформированных озер: Поппаллярви (Попали-ярви), Койвас, Кенго, Травяного и Ругозеро)

Показатель	Количество озер	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана	Мода	Стандартное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Экссесс
pH	48 (44)	5.90	8.20 (7.40)	6.73 (6.66)	6.60	6.50	0.39 (0.31)	0.15 (0.09)	1.13 (0.21)	3.21 (0.43)
Цветность, град Pt-Co	48 (44)	9.00	125	52.1 (52.1)	46.0 (52.0)	80	28.7 (28.3)	824 (799)	0.77 (0.64)	0.28 (0.24)
БПК ₅ , мг O ₂ /л	38 (34)	0.23	6.60 (2.00)	1.01 (0.87)	0.84 (0.85)	0.90	0.99 (0.35)	0.98 (0.13)	5.13 (1.20)	29.1 (2.79)
ХПК _{Cr} , мг O ₂ /л	16 (15)	9.80	37.7 (28.0)	19.2 (18.0)	18.3 (18.0)	—	7.36 (5.65)	54.1 (31.9)	1.02 (0.31)	1.27 (-0.68)
Ca ²⁺ , мг/л	48 (44)	1.00	20.3 (12.2)	3.41 (2.69)	2.30 (2.30)	2.30	3.28 (1.74)	10.7 (3.04)	3.62 (4.10)	15.5 (21.3)
Mg ²⁺ , мг/л	48 (44)	0.40	8.10 (6.40)	1.41 (1.14)	1.00 (0.90)	0.80	1.43 (0.95)	2.05 (0.90)	3.34 (4.42)	12.3 (23.4)
Na ⁺ , мг/л	46 (42)	0.90	13.6 (3.20)	1.93 (1.44)	1.30 (1.30)	1.30	2.02 (0.50)	4.09 (0.25)	4.76 (2.18)	25.8 (5.14)
K ⁺ , мг/л	46 (42)	0.10	49.6 (1.20)	2.52 (0.46)	0.45 (0.40)	0.50	8.37 (0.21)	70.10 (0.05)	4.75 (2.04)	24 (5.61)
HCO ₃ ⁻ , мг/л	48 (44)	0.90	80.2 (68.8)	12.4 (9.35)	7.8 (6.80)	6.80	15.5 (10.8)	241 (116)	3.07 (4.30)	10.3 (22.7)
SO ₄ ²⁻ , мг/л	46 (42)	0.05	73.6 (8.90)	5.87 (2.91)	2.60 (2.40)	1.90	12.0 (1.62)	144 (2.63)	4.66 (2.00)	23.8 (5.50)
Cl ⁻ , мг/л	45 (41)	0.02	30.5 (2.70)	1.79 (1.02)	1.00 (0.85)	0.70	4.43 (0.55)	19.6 (0.30)	6.47 (1.14)	42.8 (1.71)
Σ _{гр} , мг/л	45 (41)	8.80	242 (93.5)	29.9 (19.2)	17.9 (16.1)	—	41.0 (14.0)	1680 (195)	3.79 (4.14)	16.5 (21.0)
Fe _{общ} , мг/л	47 (43)	0.01	1.44	0.29 (0.28)	0.22 (0.22)	0.32 (0.01)	0.30	0.09	2.01 (2.18)	4.37 (5.43)
P _{общ} , мкг/л	48 (44)	6.00	1250 (33.0)	39.7 (12.89)	10.5 (11.0)	9.00	179 (6.51)	31949 (42.4)	6.89 (1.72)	47.6 (2.87)
N _{общ} , мг/л	40 (39)	0.25	3.87 (0.85)	0.52 (0.43)	0.42 (0.40)	0.34	0.56 (0.13)	0.31 (0.02)	5.85 (0.96)	35.9 (1.71)
N _{орг} , мг/л	46 (42)	0.18	2.98 (0.80)	0.47 (0.35)	0.35 (0.33)	0.35	0.53 (0.13)	0.29 (0.02)	4.19 (1.31)	17.6 (2.64)

Таблица 2. Статистические оценки гидрохимических параметров малых озер среднетаежного ландшафта Карелии (геохимические ландшафты 10, 33 и 37)

Показатель	Количество озер	Минимум	Максимум	Среднее	Медиана	Мода	Стандартное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Экссесс
pH	141	4.80	9.00	6.88	6.90	7.00	0.56	0.32	-0.02	1.83
Цветность, град Pt-Co	141	3.00	198	58.4	51.0	38.0	40.6	1650	1.01	0.96
БПК ₃ , мг O ₂ /л	69	0.40	8.40	1.65	1.40	0.80	1.38	1.89	2.96	10.7
ХПК _{Cr} , мг O/л	108	5.80	53.6	25.2	24.1	26.3	10.2	104	0.54	0.03
Ca ²⁺ , мг/л	141	0.70	22.2	4.30	3.00	2.80	3.71	13.8	2.48	7.80
Mg ²⁺ , мг/л	138	0.10	10.8	2.07	1.50	1.00	1.75	3.07	2.11	5.74
Na ⁺ , мг/л	103	0.50	3.90	1.58	1.50	0.80	0.75	0.56	1.04	0.90
K ⁺ , мг/л	103	0.10	3.00	0.59	0.50	0.50	0.39	0.15	3.01	14.6
HCO ₃ ⁻ , мг/л	141	0.00	90.5	18.4	12.0	12.0	17.7	314	1.97	4.35
SO ₄ ²⁻ , мг/л	111	0.50	12.8	4.45	3.80	3.80	2.72	7.42	1.15	1.33
Cl ⁻ , мг/л	134	0.30	4.80	1.31	1.10	1.00	0.90	0.80	1.66	3.34
Σ _к , мг/л	125	4.00	137	34.7	26.1	9.00	26.8	717	1.63	2.74
Fe _{общ} , мг/л	139	0.01	1.78	0.39	0.24	0.05	0.39	0.15	1.53	2.37
P _{общ} , мкг/л	127	5.00	106	26.3	20.0	10.0	18.8	353	1.43	2.14
N _{общ} , мг/л	136	0.20	1.79	0.67	0.58	0.50	0.32	0.11	1.32	1.58
N _{орг} , мг/л	136	0.16	1.69	0.58	0.48	0.32	0.31	0.09	1.47	2.09

Таблица 3. Малые озера Карелии, атипичные по различным гидрохимическим параметрам (выбросы), выявленные методом ящиконых диаграмм (I – выбросы, выявленные при анализе всех озер; II – выбросы, выявленные только при анализе без учета антропогенно трансформированных озер; III – антропогенно трансформированные озера (выбросы); IV – озера, исключенные из числа выявленных выбросов на основании последующей экспертной оценки)

№	Озеро	Координаты, град.		Происхождение	Трофический статус	Зональный тип ландшафта
		с.ш.	в.д.			
I	Аглимозеро	62.5789	36.4174	Ледниковое	Эвтрофное	Среднетаежный
	Валгмозеро	62.5830	34.9170	Тектоническое	Мезотрофное	Среднетаежный
	Ватчелское	62.2833	33.4500	Ледниковое	Мезотрофное	Среднетаежный
	Вашозеро	62.1650	34.4460	—	Олиготрофное	Среднетаежный
	Верхнее Куйто	65.0477	30.7173	Тектоническое	Олиготрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Вязозеро	63.4500	33.2667	—	Мезотрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Иля-Кялькяньярви (Иля-Калькян-ярви)	62.4333	32.2167	—	Дистрофное	Среднетаежный
	Кудамозеро	62.0500	33.1500	Ледниковое	Эвтрофное	Среднетаежный
	Могжозеро (Мовжозеро)	62.5842	36.6321	Ледниковое	Эвтрофное	Среднетаежный
	Немозеро	62.5621	36.4540	Ледниковое	Мезотрофное	Среднетаежный
	Новгудозеро	62.6440	37.2680	Ледниковое	Эвтрофное	Среднетаежный
	Падмозеро	62.5070	35.1560	Ледниково-тектоническое	Мезотрофное	Среднетаежный
	Пулозеро	63.7670	35.4170	Ледниково-тектоническое	Мезотрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Салонъярви	62.1830	32.2170	Ледниково-тектоническое	Ацидотрофное	Среднетаежный
	Светлое	62.6750	36.5310	—	Мезотрофное	Среднетаежный
Чукозеро	62.6000	37.3167	Ледниковое	Ацидотрофное	Среднетаежный	
Шапшозеро	61.5960	34.1620	—	Эвтрофное	Среднетаежный	
Яглярви	62.3384	31.7770	—	Ацидотрофное	Среднетаежный	
II	Мунозеро	62.2333	33.8500	Тектоническое	Олиготрофное	Среднетаежный
	Мурмозеро	61.6667	36.3500	Ледниковое	Эвтрофное	Среднетаежный
	Пайкъярви (Пайк-ярви)	61.5667	30.2000	—	Мезотрофное	Среднетаежный
III	Кенто	64.8667	31.1167	—	Олиготрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Койвас	64.8107	30.9752	—	Олиготрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Поппаллярви (Поппали-ярви)	64.7167	30.9667	—	Олиготрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Ругозеро	64.0667	32.7333	—	Высокоэвтрофное	Лесотундровый и северотаежный
	Травяное	64.5758	30.6614	—	Гиперэвтрофное	Лесотундровый и северотаежный
IV	Большое Черное (б/н)	62.1252	36.2716	Ледниковое	Эвтрофное	Среднетаежный
	Гангозеро	62.1167	34.6333	—	Олиготрофное	Среднетаежный
	Шавань	63.9333	34.2667	—	Мезотрофное	Лесотундровый и северотаежный

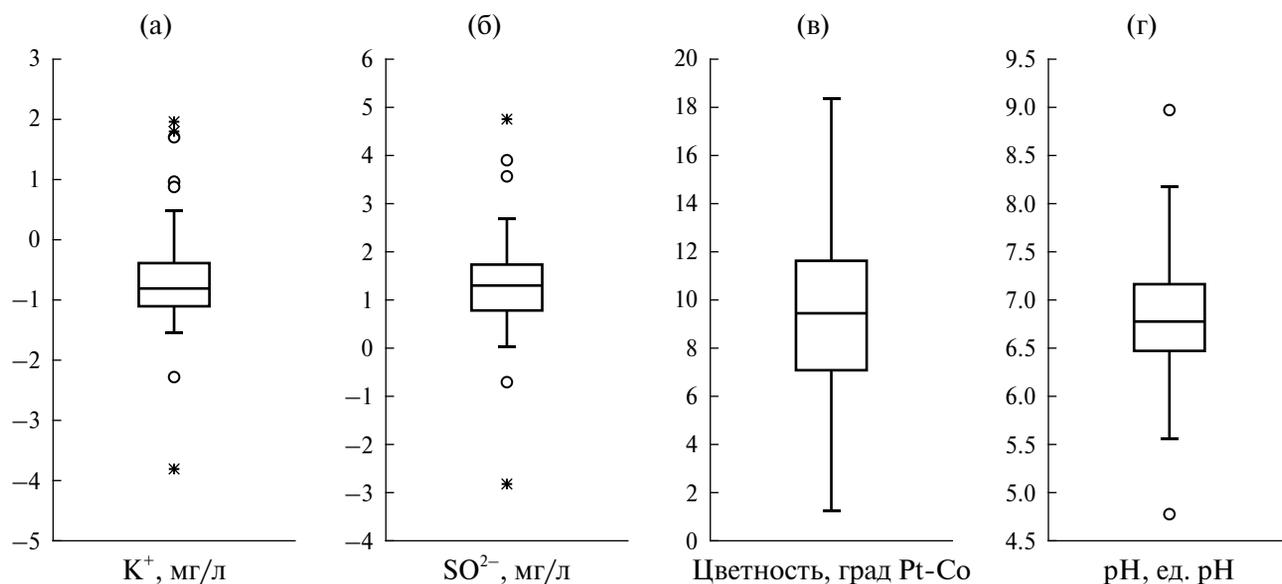


Рис. 2. Ящико́вые диаграммы для K^+ (а), SO_4^{2-} (б), цветности (в) и pH (г) (кружки – выбросы за пределами 1.5 межквартильных размахов от ближайшего квартиля, звездочки – за пределами трех межквартильных размахов).

значению XPK_{Cr} (5.8 мг О/л), а при исключении из анализируемой выборки антропогенно трансформированных озер – по высокому значению HCO_3^- (80 мг/л). Возможно, эти озера – атипичные для своих ландшафтов, однако относить их к данной категории на основе подобных единичных значений показателей, которым свойственна ярко выраженная сезонная динамика, было бы некорректным.

Наибольшее количество выбросов, обнаруженных с помощью квантильного анализа (ящико́вых диаграмм), при анализе всей выборки было в рядах K^+ – 13, Na^+ – 6 и SO_4^{2-} – 4 озера; Cl^- и $N_{общ}$ – по 2 озера; в рядах цветности, BPK_5 , XPK_{Cr} , $Fe_{общ}$ выбросов нет; для остальных параметров обнаружено по одному выбросу. При анализе выборки без антропогенно трансформированных озер выбросы по гидрохимическим параметрам дают следующую картину: в ряду K^+ – 5, HCO_3^- и Cl^- – по 3 озера; в рядах цветности, BPK_5 , XPK_{Cr} , Na^+ , $Fe_{общ}$ и $P_{общ}$ выбросов нет; для остальных параметров обнаружено по одному выбросу.

На рис. 2 в качестве примера приведены результаты квантильного анализа для некоторых гидрохимических характеристик. Как видно из

рисунка, для K^+ (рис. 2а) и SO_4^{2-} (рис. 2б) имеются как выбросы, так и нехарактерные значения, при этом само распределение K^+ имеет несимметричную форму, SO_4^{2-} – близкую к нормальной. Распределение pH (рис. 2г) несколько асимметричной формы, также имеются выбросы. По таким показателям, как $Fe_{общ}$ и цветность (рис. 2в), квантильный анализ выбросов не выявил.

Применение критерия Шовене к исследуемой выборке позволило выделить выбросы по большинству показателей, за исключением цветности, BPK_5 , XPK_{Cr} , Ca^{2+} , $N_{орг}$, $N_{общ}$ и $Fe_{общ}$. Схожие с критерием Шовене результаты показало применение критерия Рошера. В то же время этот метод позволил выделить дополнительные одиночные выбросы по Na^+ , Cl^- , $N_{орг}$, $N_{общ}$, не показанные критерием Шовене, но выявленные с помощью ящико́вых диаграмм. Таким образом, применение графического метода позволило выявить 26 озер Карелии, имеющих атипичные для соответствующих геохимических ландшафтов значения гидрохимических характеристик, с помощью критерия Шовене было обнаружено 10 из них, критерия Рошера (Томсона) – 16. Полный список озер, имеющих атипичные (аномальные) значения гидрохимических характеристик, определенный с помощью статистических мето-

дов анализа и последующей экспертной оценки выбросов, приведен в табл. 4, расположение озер на территории Карелии представлено на рис. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

Статистические оценки, представленные в табл. 1 и 2, дают представление о гидрохимии озер, типичных для двух характерных ландшафтов Карелии. Как можно заметить, для распространенного в области более низких широт среднетаежного ландшафта значения средних и медиан всех рассматриваемых гидрохимических параметров выше, чем в лесотундровом

и северотаежном ландшафте. При рассмотрении без учета антропогенно трансформированных озер разброс значений гидрохимических характеристик для среднетаежного ландшафта также больше, чем для лесотундрового и северотаежного ландшафта. Из 26 озер Карелии, выявленных с помощью статистических методов анализа и признанных атипичными по результатам последующего первичного экспертного анализа, 8 расположены в лесотундровом и северотаежном ландшафте и 18 – в среднетаежном, что составляет соответственно 14 и 11% от общего числа проанализированных в каждом ландшафте озер.

Таблица 4. Малые озера Карелии, имеющие атипичные значения гидрохимических характеристик, выявленные с использованием статистических методов анализа. В скобках приведены значения гидрохимических характеристик, рассматриваемых как аномалии (рН – ед. рН, P_{общ} – мкг/л, концентрации остальных показателей – мг/л) (I – выбросы, выявленные при анализе всех озер и дополнительно при анализе без учета антропогенно трансформированных озер; II – антропогенно трансформированные озера (выбросы))

№	Озеро	Яшиковая диаграмма	Критерий Шовене	Критерий Рошера
I	Аглимозеро	Mg ²⁺ (0.1)	Mg ²⁺	Mg ²⁺
	Валгмозеро	K ⁺ (3), HCO ₃ ⁻ (90.5)	—	—
	Ватчелское	Na ⁺ (0.5)	—	Na ⁺
	Вашозеро	Na ⁺ (0.6)	—	—
	Верхнее Куйто	K ⁺ (0.1)	K ⁺	K ⁺
	Вягозеро	SO ₄ ²⁻ (0.05), Cl ⁻ (0.02)	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻
	Иля-Кялькяньярви (Иля-Калькян-ярви)	Na ⁺ (0.6), HCO ₃ ⁻ (0), Σ _и (4), рН (4.8)	HCO ₃ ⁻ , Σ _и , рН	HCO ₃ ⁻ , Σ _и , рН
	Кудамозеро	SO ₄ ²⁻ (0.5)	—	—
	Могжозеро (Мовжозеро)	K ⁺ (0.1)	K ⁺	K ⁺
	Мунозеро	Cl ⁻ (4.8)	—	Cl ⁻
	Мурмозеро	Cl ⁻ (4.8)	—	Cl ⁻
	Немозеро	N _{общ} (0.2), N _{орг} (0.16)	—	N _{общ} , N _{орг}
	Новгудозеро	K ⁺ (0.2)	—	—
	Пайкъярви (Пайк-ярви)	K ⁺ (1.7)	—	—
	Падмозеро	HCO ₃ ⁻ (89.2)	—	—
	Пулозеро	K ⁺ (0.2)	—	—
	Салонъярви	K ⁺ (0.2)	—	—
	Светлое	Ca ²⁺ (0.7)	—	—
	Чукозеро	K ⁺ (0.1)	K ⁺	K ⁺
	Шапшозеро	K ⁺ (0.2)	—	—
Яглярви	Na ⁺ (0.5), K ⁺ (0.2)	—	Na ⁺	
II	Кенто	K ⁺ (16.9), SO ₄ ²⁻ (27.5)	K ⁺ , SO ₄ ²⁻	K ⁺ , SO ₄ ²⁻
	Койвас	K ⁺ (26), SO ₄ ²⁻ (36.6)	K ⁺ , SO ₄ ²⁻	K ⁺ , SO ₄ ²⁻
	Поппаллярви (Попали-ярви)	Na ⁺ (6.6), K ⁺ (49.6), SO ₄ ²⁻ (73.6)	K ⁺ , SO ₄ ²⁻	K ⁺ , SO ₄ ²⁻
	Ругозеро	N _{общ} (3.87)	—	N _{общ}
	Травяное	Na ⁺ (13.6), K ⁺ (3.4), Cl ⁻ (30.5), P _{общ} (1250)	Na ⁺ , Cl ⁻ , P _{общ}	Na ⁺ , Cl ⁻ , P _{общ}

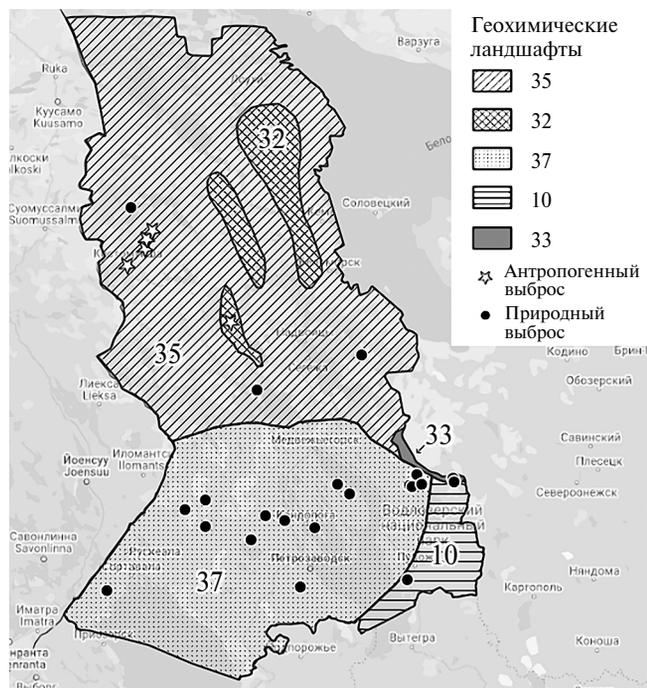


Рис. 3. Оцифрованная картосхема расположения озер, имеющих атипичные значения гидрохимических характеристик, на территории Республики Карелии.

Как видно из табл. 4, применение статистических критериев к исходным выборкам позволило выделить преимущественно озера, имеющие одиночные выбросы по какому-либо из гидрохимических параметров (15 озер из 26), но также были выделены несколько озер, имеющих выбросы сразу по нескольким характеристикам. Выбросы по наибольшему числу параметров имеют озера Иля-Кялякьярви, Травяное и Поппалиярви.

Озеро Иля-Кялякьярви, выделяющееся из всей группы рассматриваемых озер по четырем гидрохимическим показателям, – это небольшое, кислое ($\text{pH } 4.8$), бесщелочностное ($\text{C}_{\text{HCO}_3^-} = 0 \text{ мг/л}$), низкоминерализованное ($\Sigma_{\text{и}} = 4 \text{ мг/л}$), дистрофное озеро. Источники антропогенного воздействия на озеро не выявлены. Для озера характерно природное закисление. Качество воды озера оценено как низкое [8]. Концентрация Na^+ также ниже, чем в большинстве озер среднетаежного ландшафта (геохимический ландшафт 37). Таким образом, это природный выброс.

Травяное озеро – мезополигумусное, гиперэвтрофное, хлоридно-натриевое, классифи-

цированное как грязное, имеет максимальные среди всех исследованных озер Карелии концентрации общего фосфора (1250 мкг/л), натрия (13.6 мг/л) и хлоридов (30.5 мг/л). Известно, что водоем используется для приема коммунально-бытовых сточных вод г. Костомукши [8]. Загрязнение и особенности химического состава воды являются результатом сильного антропогенного воздействия данного вида.

Поппалиярви, Кенто и Койвас – мезогумусные, олиготрофные, сульфатно-калиевые, загрязненные озера, относящиеся к системе р. Кенто, которая в 2002–2007 гг. принимала стоки горно-обогатительного производства – техногенные воды из хвостохранилища Костомукшинского ГОК, обогащенные сульфатами и ионами калия [14]. В результате концентрации SO_4^{2-} в их водах в 10–25 раз превышают среднее значение и в 12–31 раз медиану для озер лесотундрового и северотаежного ландшафта. Соответствующие превышения концентраций K^+ составляют 35–103 и 42–124 раза, при этом наибольшие значения относятся к оз. Поппалиярви. Данные выбросы следует квалифицировать как антропогенные.

Еще одно озеро, квалифицированное как антропогенный выброс – Ругозеро. Это мезогумусное, гидрокарбонатно-кальциевое, высокоэвтрофное озеро. Несмотря на то, что в настоящее время оно служит приемником коммунально-бытовых сточных вод пос. Ругозеро, основной ионный состав (соотношение главных ионов) остался типичным для озер Северо-Запада РФ. До 1997 г. озеро принимало сточные воды сельскохозяйственных производств [8], что может быть причиной аномально высокого содержания азота в его воде. Естественные причины данной аномалии маловероятны, судя по тому, что в расположенном на расстоянии, немного большем 1 км, оз. Ванчозеро концентрации $\text{N}_{\text{общ}}$ и $\text{N}_{\text{орг}}$ на порядок ниже, чем в оз. Ругозеро.

По остальным озерам, имеющим аномальные значения гидрохимических характеристик, представленным в табл. 4, также был выполнен экспертный анализ. Согласно данным табл. 1 и 4, озера лесотундрового и северотаежного ландшафтов Верхнее Куйто, Вягозеро и Пулозеро

имеют аномально низкие концентрации одного или двух основных ионов. Анализ вспомогательной информации относительно данных водоемов показал, что эти низкотрофные, незагрязненные озера с водой хорошего качества практически не испытывают антропогенного воздействия. Аналогичный экспертный анализ сведений относительно атипичных озер средне-таежного ландшафта показал, что, несмотря на различия в морфометрических характеристиках, оценках трофического статуса и качества воды, выявленные выбросы также обусловлены исключительно природными аномалиями. Антропогенное воздействие на озера или полностью отсутствует (за исключением атмосферной составляющей), или ограничивается децентрализованным их использованием для нужд местного населения и любительским рыболовством. В озерах Валгмозеро, Мунозеро, Мурмозеро, Пайкъярви и Падмозеро концентрации одного или двух главных ионов заметно превышают соответствующие среднестатистические показатели, представленные в табл. 2, для остальных озер причиной выброса стали аномально низкие значения отдельных гидрохимических показателей. При этом кратность превышения или занижения медианных значений ≤ 7.5 , т. е. не столь велика, наибольшая кратность превышения отмечена для гидрокарбонат-иона. Очевидно, аномалии, выявленные на территории обоих ландшафтов, за исключением пяти антропогенно трансформированных озер, обусловлены геохимическими особенностями частных водосборов озер.

Одно из выявленных атипичных озер — Новгудозеро — расположено на территории Национального парка “Водлозерский”, что подразумевает режим особой охраны данной природной территории, способствующий сохранению расположенных на ней природных объектов. Остальные выявленные природные аномалии (озера), как показал анализ имеющейся информации об их использовании, испытывают очень незначительное антропогенное воздействие, не представляющее угрозы развития в них негативных процессов загрязнения или эвтрофирования. Поэтому данные озера в настоящее время не нуждаются в придании им статуса ООПТ в целях их сохранения.

При анализе полученной выборки озер с аномально низкими значениями гидрохимических параметров на предмет их уникальности нужно в первую очередь определиться, что следует понимать под уникальностью озер с позиции гидрохимии, при этом важно обозначить различия между атипичностью озер и их уникальностью. Согласно [9], под атипичными понимаются озерные экосистемы с характеристиками, резко выделяющимися в данных географических условиях, но при этом распространенными в мировом масштабе. Как показано в ряде работ [3, 4, 9–12] и в данном исследовании, атипичные озера можно выявить с помощью статистического подхода. Что касается уникальности, в научно-популярной литературе, на интернет-сайтах, посвященных туризму и рыбалке, эпитет “уникальное” присваивается озерам достаточно часто, однако четкого определения уникального озера, принятого научным сообществом, до сих пор нет, как нет и научно обоснованных критериев уникальности озерных экосистем. По мнению авторов, наиболее приемлем критерий, сформулированный в работе [9], согласно которому “каждая озерная экосистема по-своему своеобразна, однако для признания ее уникальности она должна характеризоваться неким специфическим набором свойств или характеристик (часто экстремальных), свидетельствующих об ее исключительности”.

Признание уникальности озер на основе выявленных экстремальных значений приемлемо при рассмотрении их возраста, ряда морфометрических и гидрологических характеристик. Экстремальные значения могут служить критерием уникальности озерных экосистем и с позиции гидробиологии, если оценивать показатели видового разнообразия, продуктивности, степени эндемизма флоры и фауны. При оценке уникальности с позиции гидрохимии все обстоит сложнее. Химический состав и гидрохимический режим озер формируются под воздействием множества факторов, среди которых — геохимические особенности озерной котловины и водосборной территории, климатические условия, состав подземных вод и атмосферных осадков, морфометрические характеристики озер, состав и количественные показатели биологических сообществ. В результате большинство гидрохи-

мических характеристик озер могут изменяться в очень широких диапазонах — это минерализация и содержание главных ионов; концентрации микрокомпонентов, в том числе тяжелых металлов, биогенных элементов; показатели органического вещества. Существуют общепринятые классификации озер на основе количественных показателей химического состава, при этом в каждую категорию (или класс), включая крайние (с наименьшими и наибольшими значениями), попадает огромное число озер, что не дает основания говорить об их исключительности, следовательно — и уникальности. Хотя ряд высокоминерализованных озер, например таких, как Эльтон и Баскунчак, классифицированных как соленые (соляные) озера, минерализация которых достигает чрезвычайно высоких значений (300–500 г/л), возможно, следует признать уникальными, несмотря на то, что соленые озера составляют очень большую группу и суммарный объем их водной массы превышает объем пресных озерных вод (без учета стока рек) [2]. При этом следует отметить, что качественный химический состав природных вод в основном одинаков, за исключением некоторых химических веществ, существование которых в водоемах возможно только при определенных условиях, например сероводорода и метана, образующихся в анаэробной среде.

Еще один важный момент заключается в том, что в данном случае речь идет только о природном химическом составе озерных вод и природной уникальности озер. В условиях антропогенного воздействия в компонентах озерных экосистем могут обнаруживаться химические вещества, не свойственные природным экосистемам (ксенобиотики). В результате загрязнения и антропогенного эвтрофирования озер концентрации тяжелых металлов, органических загрязняющих веществ, главных биогенных элементов (главным образом, фосфора) и ряда других веществ могут достигать чрезвычайно высоких значений, однако это не дает основания рассматривать эти озера как уникальные. В данном исследовании они определены как антропогенно трансформированные озера.

Как показано выше, значительная часть крупнейших озер мира может быть отнесена к разря-

ду уникальных в силу специфики протекания в них лимнических процессов, однако концентрации химических веществ в их водах в основном типичны для миллионов озер. Например, оз. Байкал, которое по совокупности параметров, безусловно, является уникальным, вряд ли может быть признано таковым с позиции гидрохимии [1]. Вероятно, при анализе гидрохимических параметров на предмет уникальности озер следует анализировать не абсолютные значения концентраций химических веществ, показателей органического вещества, физико-химических характеристик, а их соотношения, скорости и масштабы протекания химических процессов, возможно, с учетом гидрофизических, гидродинамических, гидробиологических и прочих параметров. Например, если исходить из оценки масштабов химических процессов, то кратерные глубоководные меромиктические озера Ньос и Манун (Камерун) и одно из Великих Африканских озер — оз. Киву (Руанда), где в силу особенностей происхождения, морфометрических параметров, температурного и гидродинамического режима в мнимом лимнионе накапливаются десятки и сотни кубических километров растворенных газов — диоксида углерода и метана, с позиции гидрохимии следует признать уникальными. Внезапные выбросы CO_2 в атмосферу из озер Манун и Ньос, произошедшие в 1984 и 1986 гг., уже привели к лимнологическим катастрофам, унесшим жизни соответственно 37 и около 1800 человек, живших в радиусе десятков километров от озер, а также тысяч животных, включая птиц и насекомых [7].

Несмотря на то, что вопрос, касающийся критериев уникальности озерных экосистем с позиции гидрохимии, в настоящее время остается открытым, требующим дальнейшего изучения, с учетом изложенного выше можно констатировать, что в полученной в данном исследовании выборке озер Карелии с аномальными показателями уникальных озер нет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статистические оценки 16 основных гидрохимических параметров, полученные для выборки из 223 наиболее изученных малых озер Республики Карелии, расположенных в двух

ландшафтных зонах, дают представление об их гидрохимическом облике. Установлено, что для озер среднетаежного ландшафта, расположенного в области более низких широт, значения средних и медиан всех исследованных гидрохимических параметров выше, чем для озер лесотундрового и северотаежного ландшафта.

Для выявления атипичных, в том числе уникальных с позиции гидрохимии, озерных экосистем в рамках данного исследования к выборке гидрохимических характеристик малых озер Карелии были применены классические методы статистического анализа – квантильный анализ (ящичковая диаграмма) и статистические критерии для поиска выбросов Шовене и Рошера (Томпсона). По результатам исследования критерий Шовене показал неудовлетворительные результаты, поскольку выделил только 38% выбросов, которые были определены с помощью квантильного анализа, тогда как критерий Рошера (Томпсона) – 62%. Таким образом, наибольшее количество выбросов в рядах гидрохимических характеристик было выявлено с помощью квантильного анализа, часть из них не была выявлена ни одним из примененных критериев.

Исследование тестовой выборки из малых озер Карелии на наличие аномальных значений с помощью классических статистических критериев обнаружения выбросов выявило 26 озер (~12% от общего их числа), являющихся атипичными (аномальными) по гидрохимическим параметрам для данной территории. Последующий экспертный анализ полученного списка озер показал, что причина аномалий пяти озер (Поппаллярви, Кенто, Койвас, Травяного и Ругозеро) – антропогенное воздействие, аномалии остальных озер обусловлены геохимическими особенностями их частных водосборов. Установлено, что ни одно из атипичных озер, выявленных в данном исследовании, не может претендовать на присвоение статуса уникального, хотя задача разработки критериев уникальности озерных экосистем с позиции гидрохимии требует дальнейшего развития.

Результаты исследования свидетельствуют о возможности применения статистического анализа гидрохимических параметров для вы-

явления атипичных озерных экосистем. Методически задача сводится к поиску выбросов в исходной выборке с последующим экспертным анализом для выявления характера и возможных причин аномалий.

В рамках данного исследования поиск аномальных значений проводился классическими статистическими методами. Однако дальнейшие исследования могут быть расширены путем использования других методов математической статистики для поиска аномалий, таких как кластерный анализ, робастные методы оценивания, метрические методы, многокритериальный анализ и другие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галазий Г.И.* Байкал в вопросах и ответах. Иркутск: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1987. 380 с.
2. *Егоров А.Н., Космаков И.В.* География и природопользование соленых озер. Новосибирск: Наука, 2010. 183 с.
3. *Измайлова А.В., Расулова А.М.* Возможности применения математического аппарата при анализе озер на предмет их уникальности // Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография. Т. XIX / Под ред. *Е.М. Нестерова, В.А. Снытко.* СПб.: РГПУ, 2020. С. 263–266.
4. *Измайлова А.В., Расулова А.М., Шмакова В.Ю.* Выделение озер, обладающих уникальными свойствами, статистическими методами // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 27–51.
5. Карта геохимических ландшафтов и ландшафтно-геохимических процессов. <https://geography-ofrussia.com/wp-content/uploads/2015/01/406-407.jpg> (дата обращения: 25.03.2024)
6. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
7. *Кубеев М.Н., Ионина Н.А.* 100 великих катастроф. М.: Вече, 2010. 432 с.
8. Озера Карелии. Справочник / Под ред. *Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева.* Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.
9. *Поздняков Ш.Р., Измайлова А.В., Расулова А.М.* Уникальные озера как объект научного интереса // Изв. РГО. 2020. Т. 152. № 3. С. 17–31.
10. *Расулова А.М., Измайлова А.В.* Идентификация уникальных озер различного происхождения ме-

- тодами машинного обучения // Бюлл. науки и практики. 2022. Т. 8. № 12. С. 180–194.
11. *Расулова А.М., Измайлова А.В.* Методы поиска аномальных характеристик озерных экосистем на примере трансграничных водоемов // Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Новочеркасск: Лик, 2021. С. 309–314.
 12. *Расулова А.М., Измайлова А.В.* Применение алгоритма Isolation Forest для обоснования уникальности водоемов в группе карстовых озер // Бюлл. науки и практики. 2021. Т. 7. № 11. С. 63–79.
 13. *Румянцев В.А., Дробкова В.Г., Измайлова А.В.* Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392 с.
 14. Состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 210 с.
 15. *Downing J.A., Prairie Y.T., Cole J.J., Duarte C.M., Tranvik L.J., Striegl R.G., McDowell W.H., Kortelainen P., Caraco N.F., Melack J.M., Middelburg J.J.* The Global Abundance and Size Distribution of Lakes, Ponds, and Impoundments // *Limnol. Oceanogr.* 2006. V. 51. № 5. P. 2388–2397.
 16. *Thompson R.A.* Note on Restricted Maximum Likelihood Estimation with an Alternative Outlier Model // *J. Royal Statistical Soc. Ser. B (Methodological)*. 1985. V. 47. № 1. P. 53–55.
 17. *Tukey J.W.* *Exploratory Data Analysis*. Reading, Mass: Addison-Wesley Pub. Co., 1977. 688 p.

Application of statistical criteria for identifying outliers in the analysis of hydrochemical characteristics of small lakes in Karelia

V. Yu. Krylova*, N. V. Ignatyeva

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences

St. Petersburg, 196105 Russia

**e-mail: krylova.v@speras.ru*

The hydrochemical characterization of small lakes typical for different landscapes of the Republic of Karelia was compiled on the basis of statistical assessments. The test sample to be studied was formed on the basis of hydrochemical data on 223 most studied small lakes of Karelia, divided into groups based on their belonging to one or another landscape. The possibility of identifying atypical (anomalous) lakes for a certain territory, including unique lakes, has been assessed by applying statistical criteria for identifying outliers in the analysis of hydrochemical data. The search for anomalous values was carried out by classical methods of statistical analysis, among which the graphical method of box diagram and the statistical criteria for finding outliers Chauvenet and Roscher (Thompson). The effectiveness of these methods in detecting anomalies was evaluated. An expert analysis of the obtained sample of lakes with anomalous values of hydrochemical parameters was performed in order to identify the nature and causes of anomalies, as well as the uniqueness of lakes. The ways of further research on the possibility of using mathematical statistics methods to search for anomalies, as well as the development of criteria for the hydrochemical uniqueness of lakes are outlined.

Keywords: lake ecosystem, lake hydrochemistry, unique lakes, anomaly search, statistical outliers.