

## УНИКАЛЬНЫЕ ОЗЕРА КАК ОБЪЕКТ НАУЧНОГО ИНТЕРЕСА

© 2020 г. Ш. Р. Поздняков<sup>а</sup>, \*, А. В. Измайлова<sup>а</sup>, \*\*, А. М. Расулова<sup>а</sup>, \*\*\*

<sup>а</sup>*Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, Россия*

\**E-mail: tbgmaster@mail.ru*

\*\**E-mail: ianna64@mail.ru*

\*\*\**E-mail: arasulova@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.05.2020 г.

После доработки 04.08.2020 г.

Принята к публикации 20.08.2020 г.

По мере развития и расширения сети особо охраняемых природных территорий часто встает вопрос научного обоснования уникальности той или иной территории или акватории. На примере озерных экосистем предлагается рассмотреть возможность применения статистических подходов при таких обоснованиях. Каждая озерная экосистема по-своему своеобразна, однако для признания ее уникальности должен иметь место специфический набор свойств или характеристик, свидетельствующих об ее исключительности. В статье рассматривается вопрос о том, какие же водоемы можно признать уникальными именно с научной точки зрения. Предлагается оценивать уникальность с учетом анализа выборок, построенных по различным признакам (параметрам), характеризующим озерные экосистемы и происходящие в них процессы. По части параметров уникальные озера будут характеризоваться аномальными значениями, которые часто будут выявлены для одних и тех же единиц совокупности. Также анализируются непараметризуемые признаки, которые могут свидетельствовать об уникальности водоема, поскольку до сегодняшнего дня основным способом определения уникальности остаются экспертные оценки, отличающиеся определенной субъективностью.

*Ключевые слова:* озерная экосистема, уникальные озера, классификации озер, статистическая совокупность, анализ данных, поиск аномальных значений

DOI: 10.31857/S0869607120030088

## ВВЕДЕНИЕ

В научно-популярной литературе в последнее время появились публикации, посвященные озерам, называемым “уникальными”. С точки зрения популяризации географии такие работы имеют значительную ценность, однако с научной точки зрения многие описываемые при этом водоемы достаточно типичны, хоть и обладают какими-либо яркими особенностями, которые чаще всего приковывают к себе внимание по субъективным признакам, прежде всего – визуальной привлекательности. В то же время критерии уникальности до сих пор точно не определены. Данный вопрос имеет значительную научную ценность, в частности, в связи с проблемой совершенствования научных основ развития и расширения сети особо охраняемых природных территорий. Цель настоящей статьи – рассмотреть возможность выявления критериев уникальности на основании анализа выборок, построенных по различным параметрам, в том числе морфометрическим. Рассмотрено, что такое озерная экосистема, как она формируется и развивается, обозначено, какие параметры свидетельствуют об экстре-

мальности среды, приводящей к ее уникальности. Рассмотрен один из возможных математических аппаратов, позволяющий проанализировать интересующие параметры.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Озером называется котловина или впадина земной поверхности, заполненная или периодически заполняемая водой, не имеющая непосредственной связи с океаном и характеризующаяся замедленным водообменом [17, с. 5]. Озера образуются в том случае, когда приток вод в котловину превосходит потери воды на испарение, фильтрацию и отток. Однако прежде должна образоваться сама озерная котловина, возникновение которой может быть связано с деятельностью эндогенных или, чаще, экзогенных процессов, в ряде случаев с их последовательным воздействием. Сформировавшаяся котловина постепенно заполняется водой, поступающей с водосбора. Ее химический состав формируется благодаря целому комплексу факторов, среди которых подстилающие горные породы, почвы, атмосферные осадки, подземные воды, живые организмы. Появившиеся в различные периоды геологической истории и сформировавшиеся в разнообразных природных условиях озера обретают свой гидрологический, гидрохимический и термический режимы и постепенно населяются всевозможными живыми организмами. Совокупность всех обитающих в водоеме живых организмов, связанных между собой потоками вещества и энергии и окружающей их неживой среды обитания, образует озерную экосистему. При этом не существует абсолютно одинаковых по своему химическому составу вод и полностью идентичных друг другу экосистем, каждая из которых отличается набором характерных лишь ей внутренних свойств и характеристик. Однако при всем своем многообразии, сформировавшиеся в схожих условиях озерные экосистемы обычно обладают значительным сходством. На основе сходства элементов по конкретным основаниям строятся их классификации. Среди существующего множества классификаций озер наибольший интерес представляют те, которые отражают закономерности формирования, структуры, функционирования озера как целостной геосистемы. Здесь можно привести классификации озер по происхождению котловин [13, 15, 27, 32, 38 и др.], их морфометрическим особенностям [4, 9, 10 и др.], водному балансу и внешнему водообмену [5], особенностям термического режима [22, 24, 28, 41, 42 и др.], типу минерализации и химическому составу воды [1, 2, 19 и др.], гидробиологическим показателям, учитывающим таксономическую структуру и характеристику озер по преобладающему распространению в них определенных водных организмов [6, 23, 25, 35 и др.].

На фоне большинства озер, характеризующихся сходством по целому ряду параметров, всегда находятся водоемы, которые отличаются экстремальными характеристиками – наиболее древние, глубокие, обладающие чрезвычайной степенью расчлененности берегов, аномальным температурным режимом, крайними значениями минерализации воды, необычным соотношением между величинами концентраций различных ионов, наличием повышенных количеств каких-либо специфических компонентов газового или солевого составов, отличающиеся крайней продуктивностью, высоким видовым разнообразием или эндемизмом флоры и фауны. Благодаря своим резко отличным характеристикам такого рода озера могут рассматриваться как уникальные. Таким образом, 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.

Другими словами, если все озера мира представить, как статистическую совокупность с набором признаков (параметров), характеризующих сами озерные экосистемы и происходящие в них процессы, то большинство выборок, построенных по этим параметрам на основе данных реальных измерений, может быть описано с помощью

теоретического распределения вероятностей. При этом по многим выборкам оно будет близко к нормальному, как наиболее часто встречающемуся в природе, с положительной или отрицательной асимметрией. В то же время по части параметров будут наблюдаться “выбросы”, резко выделяющиеся из общей выборки. Так как для озерных экосистем характерна взаимная обусловленность происходящих в них процессов, эти “выбросы” часто будут выявлены для одних и тех же единиц совокупности, то есть для озер, имеющих аномальные значения по целому ряду характеристик. При этом аномальные значения по одному признаку могут приводить к “выбросам” еще по целому ряду параметров. С позиции статистики именно такие озера и следует рассматривать как уникальные. Следует уточнить, что в данной работе под “выбросом” понимается “элемент маломощного подмножества выборки, существенно отличающийся от остальных элементов выборки” [7, с. 1]. В то же время априори предполагается, что статистическая совокупность данных не содержит ошибок измерений. Следовательно, в данном случае можно говорить, что “выбросы” совпадают с аномалиями данных.

Поскольку происхождение озерной котловины в значительной степени определяет главные типические особенности озера, наряду с рассмотрением генеральной совокупности всех озер мира, имеет смысл оценивать статистические совокупности озер с общим происхождением. Как указывал А.Г. Исаченко, генетические особенности геосистем — происхождение, возраст, пути развития — находят косвенное отражение в их современных структурно-динамических и функциональных свойствах, вплоть до чисто внешних, геометрических черт [20, с. 10]. В связи с этим именно такой подход был выбран нами при первичном анализе, который будет продемонстрирован в рамках настоящей статьи.

Как известно, происхождение преобладающего большинства озерных котловин связано с экзогенными процессами, что в значительной мере определяет их относительную молодость. Котловин, образованных тектоническими движениями земной коры, а также сейсмическими и вулканическими процессами, крайне мало. Согласно [29, с. 124], на их долю приходится лишь несколько процентов числа мировых озер. В то же время, поскольку энергия земных недр, если она высвобождается, чаще всего намного превосходит энергию внешних по отношению к Земле сил, то среди наиболее крупных и глубоких водоемов мира абсолютно преобладают озера, занимающие котловины тектонического и вулканического происхождения (с учетом того, что часть из них в дальнейшем подверглась ледниковой экзарации). Огромные размеры озерных котловин во многом обуславливают совершенно иное протекание в них целого ряда лимнических процессов, что обычно проявляется при попытках сравнения информации, полученной по крупнейшим озерам, с остальными водоемами Земли. Благодаря этому крупнейшие озера часто выделяют в особый вид водных объектов, что позволяет охарактеризовать значительную часть из них как уникальные. Еще А.Г. Исаченко указывал, что крупные озера, такие как Байкал, Ладожское, могут представлять собой уникальные водоемы, сопоставимые по своим размерам и внутренней структуре с региональными геосистемами различных рангов. Они практически не находят себе место в ландшафтных классификациях и в ландшафтном (физико-географическом) районировании, что вряд ли можно считать нормальным [20, с. 14]. Многие крупнейшие озера характеризуются и наиболее древним возрастом котловин, который для большинства рифтовых водоемов оценивается от 25 до 2 млн лет, а у котловин остальных тектонических озер исчисляется сотнями тысяч лет. Экстремальные по ряду параметров размеры котловины, сочетающиеся с древним возрастом и высочайшей степенью эндемизма флоры и фауны, бесспорно, свидетельствуют об уникальности таких водоемов.

Так, не вызывает сомнения уникальность самого глубокого и вместительного пресноводного водоема суши — оз. Байкал. Возраст котловины озера традиционно определяется в 25–35 млн лет. В озере насчитывается более 2628 видов и подвидов животных,

из которых 56% являются эндемиками [21, с. 24], а также 1085 видов и разновидностей растений, из которых эндемичны 6 родов, 133 вида и 62 разновидности [3, с. 32].

Оз. Танганьика является самым длинным и вторым по глубине и объему заключенной пресной воды озером мира. Это старейшее из озер Восточно-Африканского рифта, возраст которого оценивается разными авторами от 7 до 20 млн лет. В водах Танганьики обитает 2156 представителей флоры и фауны, среди которых около 600 видов — эндемики [30, с. 157].

Одним из 20 древнейших озер на Земле является Ньяса, четвертое по объему заключенной пресной воды. Для озера характерна богатая, высоко эндемичная фауна. Согласно данным Программы ООН по окружающей среде, в озере насчитывается около 500 видов рыб, эндемичных на 90%. Так как многие виды не описаны, ряд специалистов указывает, что в озере обитает около 1000 разновидностей рыб [31, с. 9, 33, с. 126].

Бесспорно, уникальным является и оз. Восток ( $76^{\circ}$ – $78^{\circ}$  южной широты), перекрытое ледяным щитом толщиной 3600–4350 м. Его водное зеркало не горизонтально как в обычных озерах, а находится под наклоном порядка шести угловых минут [16, с. 29]. Возраст оценивается в 35 млн лет [8, с. 816]. Экосистема озера уникальна тем, что находилась в изоляции от земной поверхности на протяжении сотен тысяч лет.

Специального упоминания заслуживают озера, возникающие в вулканических регионах. Наряду с многократно встречающимися аномальными морфометрическими характеристиками, многие из них характеризуются чрезвычайным разнообразием химического режима. В активных кратерах действующих вулканов часто находятся кислые термальные, в той или иной степени минерализованные озера. Источником воды, тепла и растворенных компонентов в них являются атмосферные осадки, внутрикратерные термальные источники и субаквальные фумарольные выходы [36, с. 532]. Для таких кратерноозерных водных масс характерны самые различные и специфические, отличающиеся от таковых в других типах озер физико-химические и гидрологические процессы. В аномальных гидрохимических и гидротермических условиях формируются и особые водные биоценозы, приспособленные к кислой воде.

Интересны озера зоны недостаточного увлажнения, отличающиеся аномальной соленостью. Среди наиболее крупных высоко минерализованных озер мира — расположенное в долине р. Иордан Мертвое море (соленость 270–310‰, в нижнем слое — до 400‰), и лежащее в Афарской котловине оз. Ассаль (350–400‰). В России крупнейшими соляными водоемами являются оз. Эльтон (200–500‰, в частности, 468‰ по данным измерений ИНОЗ РАН 12.08.2019) и оз. Баскунчак (около 300‰, 360‰ по данным измерений ИНОЗ РАН 16.08.2019). Котловины российских озер образованы между крупными соляными куполами, что придает уникальность геосистемам, включая их прибрежную часть.

Возникшие в определенных природных условиях озера обретают свой гидрологический и термический режим, чаще всего отражающий эти условия и характерный для водоемов данной природной зоны. Тем не менее в ряде случаев их режим может резко отличаться от большинства находящихся рядом озер. Особым гидротермическим режимом характеризуются водоемы, расположенные в регионах фумарольной и гидротермальной активности. Значительное влияние на особенности протекания гидрологических и гидротермических процессов могут оказывать и другие местные факторы (специфика подземного питания, морфометрические особенности котловины и др.). В этом случае водоемы будут выпадать по термическому или гидрологическому режиму из своей климатической зоны, что скажется на происходящих в них биологических процессах и может резко выделить такие озера по целому ряду параметров. Здесь очень важно соблюсти различия между атипичностью (наблюдающейся у озер с характеристиками, резко выделяющимися в данных географических условиях, но при этом распространенными в мировом масштабе) и уникальностью (когда определенные характеристики действительно крайне редки). В этой связи представляется, что

предлагаемый в рамках настоящего исследования анализ выборок, построенных по различным параметрам, может облегчить данную задачу.

Также уникальными могут быть признаны и целые группы малых водоемов, как например, карстовые Голубые озера в Кабардино-Балкарии или лежащие в окружении травертина Плитвицкие озера в Хорватии. Оз. Церик-Кель, входящее в группу Голубых озер, обладает аномальным соотношением глубины (279 м) к площади водной поверхности (2 га) [12, с. 92]. Особенностью Плитвицких озер выступает постоянное изменение системы соединяющих их водопадов, связанное с непредсказуемостью поведения травертина [26, с. 21]. Есть основания утверждать, что предлагаемый нами метод поможет выделить также и другие группы малых водоемов.

Наряду с показателями, характеризующими необычные условия среды обитания, особый интерес представляет уникальность озерных экосистем, признаваемая благодаря специфике населяющих ее организмов. Озерные экосистемы различаются по видовому разнообразию, продуктивности, степени эндемичности населяющей их флоры и фауны. Согласно [14], видовое разнообразие складывается из видового богатства, или плотности видов, которое характеризуется общим числом имеющихся видов, а также из их выравненности, основанной на относительном обилии или другом показателе значимости вида и положении его в структуре доминирования. Для оценки специфики структурно-функциональной организации сообществ гидробионтов с учетом видовой плотности и выравненности часто используется индекс Шеннона [37, 39]. Также используется индекс Симпсона [40], оценивающий разнообразие на основе подсчета связности между внутренними элементами экосистемы, обеспечивающей ее единство и функционирование. В отличие от уникальных условий абиотической среды, относительно легко вычисляемых при анализе характеризующих ее показателей, оценка уникальности биоценоза представляется более сложной. Она может быть достаточно легко определена при экстремальной продуктивности водоема, чрезвычайном видовом разнообразии или высокой степени эндемичности биоты. Оценка биоценозов по степени сложности их организации менее очевидна и, несмотря на наличие индексов, характеризующих разнообразие, пока недостаточно параметризована.

Таким образом, предлагаемый подход к определению уникальности за счет анализа выборок позволяет выделить озера, характеризующиеся экстремальными значениями лишь по ряду измеряемых параметров (морфометрические показатели, температурные характеристики, минерализация, кислотность, продуктивность и др.), в то время как далеко не все происходящие в озерах процессы могут быть параметризованы. Кроме того, на сегодняшний день количество лимнологически изученных озер крайне невелико. Поэтому необходимо признать, что важнейшим способом определения уникальности остаются экспертные оценки, на уровне которых могут быть выявлены дополнительные признаки, свидетельствующие о возможности рассматривать озеро как уникальное. Применение статистических методов позволяет алгоритмизировать процесс, внести научное обоснование в выборки, а также выявить новые водоемы, которые в дальнейшем могут более подробно анализироваться на предмет уникальности их экосистем.

#### ПРИМЕР ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ИЗ РЯДА МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Для примера проанализируем статистические характеристики морфометрических параметров некоторых озер, представленных в разработанной в Институте озероведения РАН базе WORDLAKE [18]. На начальном этапе рассмотрим озера, котловины которых имеют тектоническое происхождение. Как уже указывалось выше, к этой группе относится большинство наиболее глубоких и древних водоемов мира. В процессе анализа выяснено, что наиболее крупные озера являются аномалиями, сильно

Таблица 1. Описательная статистика морфометрических показателей тектонических озер. Пояснения в тексте  
 Table 1. Descriptive statistics of morphometric indicators of tectonic lakes. Explanations are at the text

Морфометрический показатель	Кол-во объектов	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартная ошибка среднего	Стандартное отклонение	Дисперсия	Асимметрия	Стандартная ошибка асимметрии	Экссесс	Стандартная ошибка эксцесса
$L$ , км	577	0.05	$1.2 \times 10^3$	30.111	3.500	84.071	$7.067 \times 10^3$	8.023	0.102	85.010	0.203
$W$ , км	545	0.01	435	10.894	1.160	27.071	732.840	9.078	0.105	121.507	0.209
$S$ , км <sup>2</sup>	685	$5 \times 10^{-4}$	$3.864 \times 10^5$	$1.273 \times 10^3$	$5.84 \times 10^2$	$1.528 \times 10^4$	$2.336 \times 10^8$	23.684	0.093	592.544	0.187
$L$ , км	446	0.12	$6 \times 10^3$	137.378	20.299	428.687	$1.837 \times 10^5$	8.217	0.116	90.797	0.231
$H_{avg}$ , м	439	0.1	740	19.924	2.766	57.959	3359.246	7.711	0.117	76.632	0.233
$H_{max}$ , м	541	0.15	$1.65 \times 10^3$	41.713	5.369	124.871	$1.559 \times 10^4$	8.531	0.105	91.243	0.210
$V$ , км <sup>3</sup>	435	$4.35 \times 10^{-9}$	$7.87 \times 10^5$	314.848	193.977	$4.045 \times 10^3$	$1.636 \times 10^7$	17.473	0.117	329.489	0.234
$C$ , км <sup>2</sup>	321	0.14	$3.66 \times 10^6$	$4.713 \times 10^4$	$1.528 \times 10^4$	$2.737 \times 10^5$	$7.49 \times 10^{10}$	10.138	0.136	116.050	0.271
$H_{max}^*$	719	$9.09 \times 10^{-5}$	1	$1.9 \times 10^{-2}$	$2.48 \times 10^{-3}$	$6.653 \times 10^{-2}$	$4.427 \times 10^{-3}$	9.704	0.091	118.956	0.182
$H_{avg}^*$	719	$1.3 \times 10^{-4}$	0.987	$1.62 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-3}$	$6.173 \times 10^{-2}$	$3.811 \times 10^{-3}$	9.689	0.091	122.037	0.182
$c$	424	0.033	0.918	0.464	$6.847 \times 10^{-3}$	0.141	$1.988 \times 10^{-2}$	-0.015	0.119	-0.274	0.237
$H^{**}$	533	$1.6 \times 10^{-5}$	0.13	$1.51 \times 10^{-2}$	$9.857 \times 10^{-4}$	$2.276 \times 10^{-2}$	$5.179 \times 10^{-4}$	2.236	0.106	5.500	0.211
$k_s$	544	$2.857 \times 10^{-2}$	1	0.527	$1.136 \times 10^{-2}$	0.265	$7.023 \times 10^{-2}$	0.256	0.105	-0.851	0.209
$S^*$	685	$1.3 \times 10^{-9}$	1.001	$3.3 \times 10^{-3}$	$1.513 \times 10^{-3}$	$3.96 \times 10^{-2}$	$1.568 \times 10^{-3}$	23.684	0.093	592.545	0.187
$V^*$	435	$2.29 \times 10^{-11}$	1	$4 \times 10^{-3}$	$2.465 \times 10^{-3}$	$5.141 \times 10^{-2}$	$2.643 \times 10^{-3}$	17.473	0.117	329.5	0.234

влияющими на форму распределения. Поэтому они были исключены из выборки, что позволило более детально оценить ее остальные элементы.

Так как размерные характеристики ( $L$  – длина озера (км),  $W$  – его ширина (км),  $S$  – площадь (км<sup>2</sup>),  $l$  – длина береговой линии (км),  $h$  – глубина (м),  $V$  – объем (км<sup>3</sup>),  $C$  – площадь водосбора (км<sup>2</sup>)) имеют большой разброс значений, будем, как это предлагается в [11], рассматривать безразмерные характеристики, полученные по формулам:

$$H_{\max}^* = \frac{H_{\max}}{H_{\max B}}, \quad (1)$$

$$H_{\text{avg}}^* = \frac{H_{\text{avg}}}{H_{\text{avg B}}}, \quad (2)$$

$$c = \frac{H_{\text{avg}}}{H_{\max}}, \quad (3)$$

$$H^{**} = 10^{-3} \frac{H_{\max}}{\sqrt{S}}, \quad (4)$$

$$k_s = \frac{W}{L}, \quad (5)$$

$$S^* = \frac{S}{S_{\text{KS}}}, \quad (6)$$

$$V^* = \frac{V}{V_{\text{KS}}}, \quad (7)$$

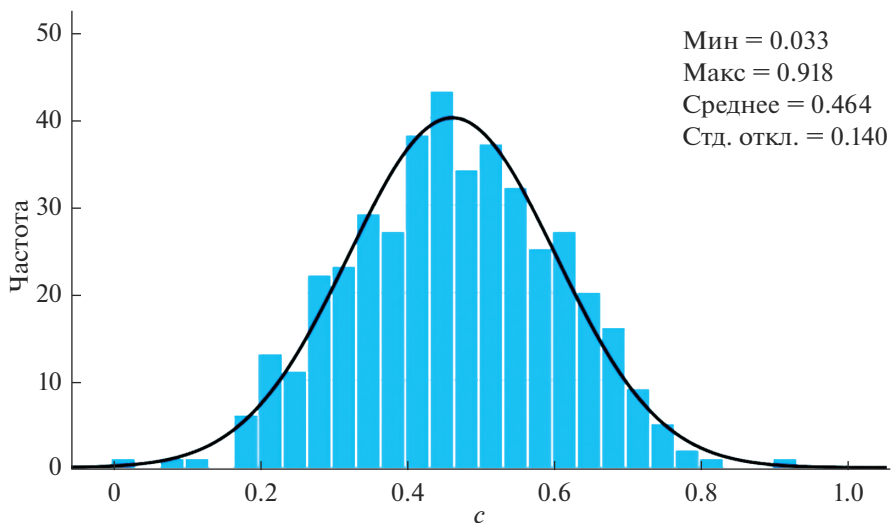
где  $H_{\max}^*$  – безразмерная максимальная глубина,  $H_{\text{avg}}^*$  – безразмерная средняя глубина,  $c$  – коэффициент формы котловины озера,  $H^{**}$  – относительная глубина, (соотношение между вертикальным и горизонтальным масштабом озера),  $k_s$  – коэффициент сжатия, отвечающий за форму озера в горизонтальной плоскости,  $S^*$  – безразмерная площадь озера,  $V^*$  – безразмерный объем озера,  $H_{\text{avg B}}$ ,  $H_{\max B}$  – средняя и максимальная глубины озера Байкал,  $S_{\text{KS}}$ ,  $V_{\text{KS}}$  – площадь и объем Каспийского моря.

Анализ характеристик (табл. 1) показывает, что формы распределений имеют преимущественно асимметричный вид, аналогично общей совокупности. Исключение составляет, например, коэффициент формы озерной котловины  $c$ , зависящий от средней и максимальной глубины. Значения асимметрии и эксцесса находятся в интервалах  $-1 < A < 1$  и  $-3 < E < 3$  соответственно, что характерно для нормального распределения. Была произведена проверка нулевой гипотезы: наблюдаемое распределение коэффициента формы озерной котловины тектонических озер не отличается от теоретически ожидаемого нормального распределения. Проверка производилась с помощью теста Колмогорова–Смирнова с поправкой Лилефорса. Поскольку вероятность справедливости данной гипотезы  $P$  больше 0.05 ( $P = 0.200$ ), следовательно, анализируемое распределение не отличается от нормального. Гистограмма наблюдаемых значений с кривой нормального распределения приведена на рис. 1, основные статистические показатели – в табл. 2.

Также близкой к нормальному является форма распределения коэффициента сжатия  $k_s$ , который отвечает за форму озера в горизонтальной плоскости. Анализ остальных морфометрических характеристик выборки указывает на наличие асимметрии, смещенной в область малых значений, которая лучше всего описывается гамма-распределением.

**Таблица 2.** Описательная статистика коэффициента формы озерной котловины тектонических озер**Table 2.** Descriptive statistics of the shape factor of the tectonic lakes basin

Статистические характеристики	Значения статистических характеристик для коэффициента формы озерной котловины $c$
Количество объектов	424
Диапазон	0.884
Минимум	0.033
Максимум	0.918
Среднее	0.464
Стандартная ошибка среднего	0.006
Стандартное отклонение	0.145
Дисперсия	0.020
Асимметрия	-0.015
Стандартная ошибка асимметрии	0.119
Экссесс	-0.274
Стандартная ошибка эксцесса	0.237

**Рис. 1.** Гистограмма коэффициента формы озерной котловины ( $c$ ) с кривой нормального распределения.**Fig. 1.** Histogram of the lake basin shape factor ( $c$ ) with a bell curve.

На рис. 2а представлен Q–Q график (или квантиль-квантильный), который отображает квантили распределения переменной по сравнению с квантилями теоретического распределения. Из него следует, что в области малых и больших значений есть наблюдения, отклоняющиеся от нормального. Более наглядно это показано на безтрендовом Q–Q графике (рис. 2б). Также данный график нагляден с точки зрения поиска “выбросов” или аномальных значений. Экстремальные отклонения от нулевой линии находятся не более чем на  $\pm 0.04$  стандартных отклонения, что не подпадает под “выбросы”. Тем не менее можно говорить, что тектонические озера в области малых



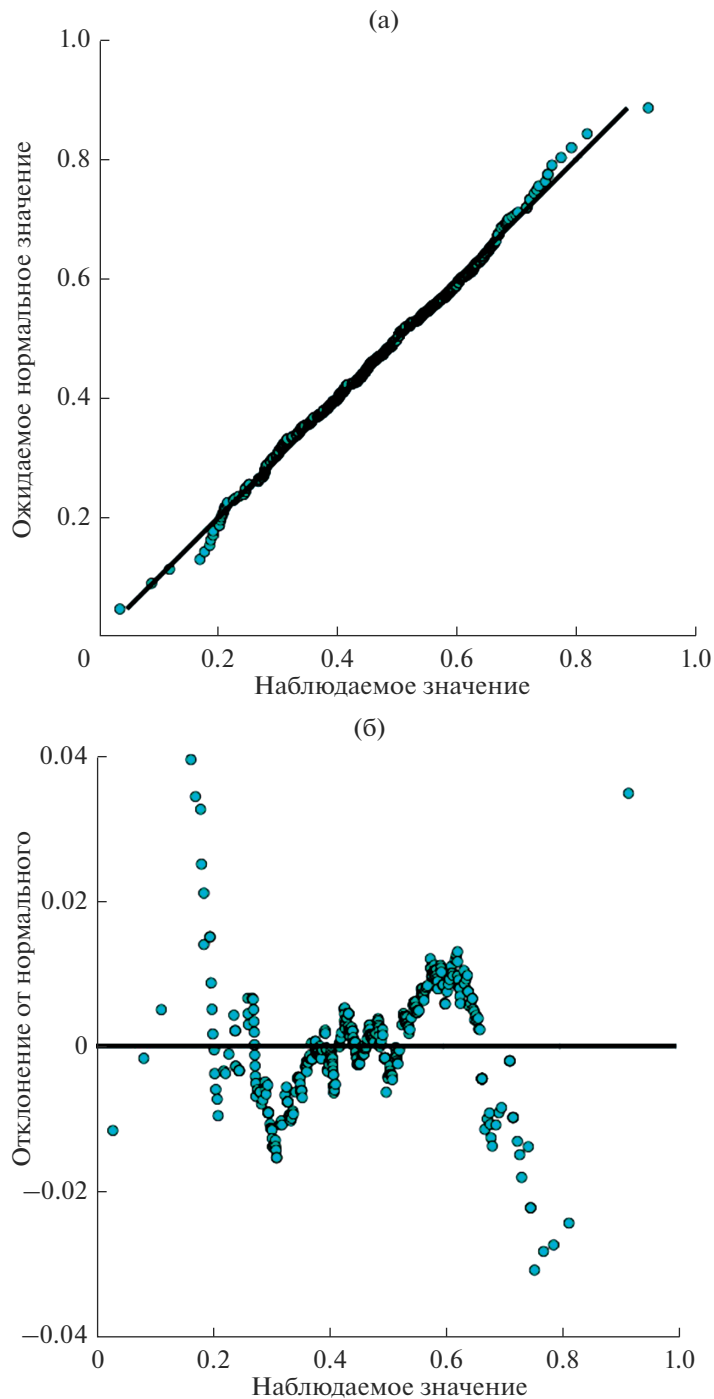
( $c < 0.2$ ) и больших ( $c > 0.7$ ) значений формы озерной котловины имеют наибольшие отклонения от нормального закона распределения, делая его более плосковершинным.

Если говорить о “выбросах” и аномальных значениях, то наглядно их можно увидеть на диаграмме размаха (называемой также диаграмма “ящик с усами”) (рис. 3). На оси абсцисс отложена переменная, а на оси ординат – стандартизованные оценки коэффициента формы озерной котловины  $c$ . Высота прямоугольника на диаграмме соответствует значениям от первого до третьего квартиля, а горизонтальная линия внутри прямоугольника – медиана. “Усы” диаграммы отвечают за максимальные и минимальные значения. Кружки находящиеся выше “верхнего уса” или ниже “нижнего уса” соответствуют “выбросам” с числом порядкового номера объекта в выборке.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Необходимо отметить, что на большинстве диаграмм размаха, построенных нами для проведенных выборок морфометрических характеристик озер, присутствовали многочисленные “выбросы”, влияющие на форму распределения. Интересно, что даже при первичном анализе выбросов лишь по некоторым морфометрическим характеристикам мы получили список озер, многие из которых характеризуются как уникальные и на уровне экспертных оценок. Так, среди водоемов, выявленных при анализе диаграмм размаха по большинству параметров, приводимых в табл. 1, прежде всего обращают на себя внимание такие озера, как Охридское (выявлено по диаграммам размаха морфометрических признаков  $L, W, S, I, H_{avg}, H_{max}, V$  как “выброс”) – самое глубокое и древнее на Балканском полуострове, с уникальной водной экосистемой, включающей более 200 эндемиков, и оз. Тонлесап (выявлено по диаграммам размаха морфометрических признаков  $L, W, S, I, H_{avg}, H_{max}, V$  как “выброс”) – самый большой водоем п-ова Индокитай, характеризующийся аномальными колебаниями площади, связанными с ежегодным разливом во время сезона дождей и являющийся одним из наиболее рыбопродуктивных пресноводных водоемов мира. “Выбросами” на приведенной диаграмме размаха (рис. 3) для коэффициента формы ( $c$ ) являются соленые озера Симби на западе Кении (северо-восточнее оз. Виктория) и Тонхил Нуур на юго-западе Монголии, из которых оз. Симби включено в одноименный национальный заповедник (Lake Simbi National Sanctuary). Озеро представляет собой небольшой по площади ( $0.29 \text{ км}^2$ ), глубокий (25 м) щелочной высокопродуктивный водоем с хорошо выраженным хемоклином [34] и является одним из важнейших резерватов водно-болотных птиц Рифтовой долины.

Представляется, что предложенный нами подход к оценке уникальности за счет анализа выборок позволит вычленивать не только крайние (в большинстве случаев максимальные) значения какого-либо параметра, но и значения, резко выпадающие из выборки, что особенно важно в силу множественности локальных систем малого размера, которые лишь при таком подходе могут быть выделены. Другими словами, это дает возможность вычленивать также и группы небольших озер (скорее всего расположенных в аналогичных экстремальных условиях), которые в силу каких-либо причин по ряду параметров резко отличаются от других водоемов данного ранга. Еще раз необходимо подчеркнуть, что выявление уникальных озер еще долго будет опираться на экспертные оценки; в то же время внедрение предложенного в настоящей статье подхода по анализу выборок может рассматриваться как крайне перспективное направление исследований, сосредоточенных на совершенствовании научных основ обоснования особо охраняемых природных территорий.



**Рис. 2.** Квантиль-квантильный график (а) и бестрендовый квантиль-квантильный график (б) для коэффициента формы озерной котловины тектонических озер (с).

**Fig. 2.** Quantile-quantile plot (a) and trendless quantile-quantile plot (б) for the shape factor of the tectonic lakes basin (с).

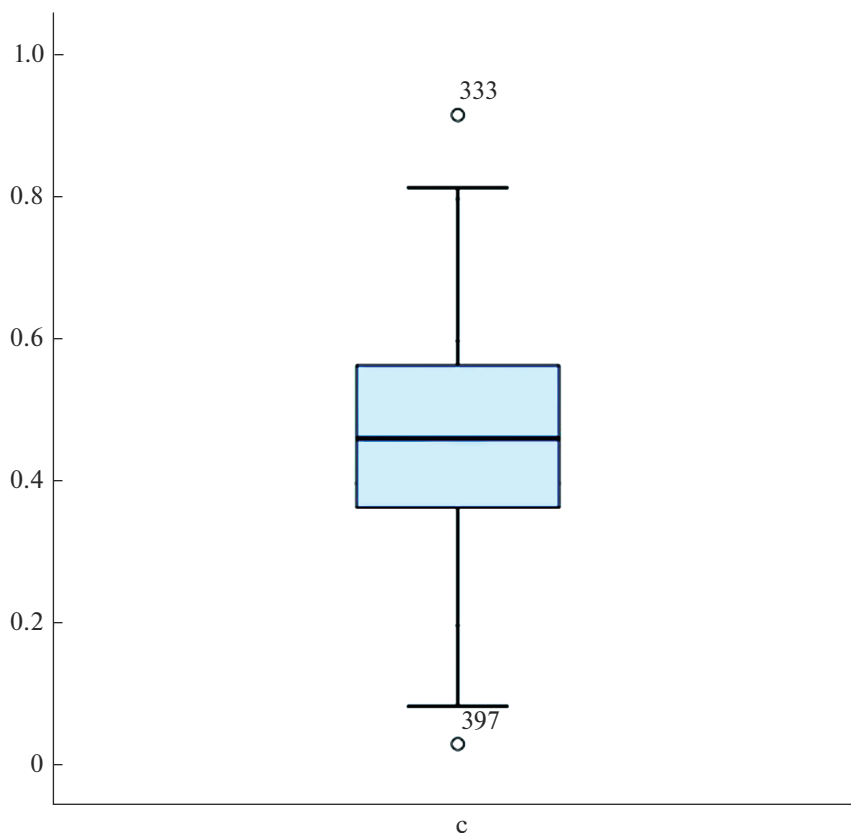


Рис. 3. Диаграмма размаха для коэффициента формы озерной котловины  $c$ .

Fig. 3. Box-and-whisker plot for the shape factor of the lake basin ( $c$ ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, надо отметить, что выявление уникальных озер наряду с распространенной на настоящий момент экспертной оценкой может опираться и на статистический аппарат. С этой целью авторами статьи предлагается проводить анализ выборок, построенных по различным параметрам, характеризующим озерные экосистемы и происходящие в них процессы. При этом, прежде всего, необходимо ориентироваться на абиотические характеристики экосистемы, и уже отталкиваясь от степени их экстремальности, анализировать сложившиеся в данных условиях биоценозы. Первые шаги в этом направлении нами уже сделаны и требуют дальнейшего продолжения. Более подробный анализ позволит не только вычленивать новые уникальные озера, но и определить, рассмотрение каких параметров наиболее перспективно. Безусловно, требуется определение оптимального механизма выявления “выбросов” при анализе выборки, и для этого необходим значительно больший объем исследований. Перспективность выбранного пути не вызывает сомнений.

Важность алгоритмизации выявления уникальных природных объектов очевидна в связи со сложностью обоснования отнесения той или иной территории к категории особо охраняемых, что достаточно часто имеет место. Поэтому предлагаемый в рамках настоящей статьи анализ выборок параметров, характеризующих озерные экосисте-

мы, может представлять значительный интерес и при изучении других природных объектов. Кроме того, анализ механизмов, происходящих в экстремальных по каким-либо параметрам условиях, которые и позволяют характеризовать озеро как уникальное, имеет важное значение для развития лимнологии, предоставляя дополнительный материал для изучения и понимания процессов, происходящих в озерных экосистемах. Расширение наших общих представлений об особенностях их функционирования позволяет вывести исследования водных ресурсов планеты на новый уровень.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 20-05-00303/20.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алёкин О.А. К вопросу о химической классификации природных вод // Вопросы гидрохимии. Тр. НИУ ГУГМС. 1946. Сер. 4. Вып. 32. С. 25–39.
2. Баранов И.В. Лимнологические типы озер СССР. Л.: Гидрометеоздат, 1962. 276 с.
3. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учебное пособие. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2009. 291 с.
4. Богданов В.В. Зонально-региональные свойства лимногенеза и их роль в классификации и районировании озер // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. Л.: Изд-во АН СССР. Геогр. общество СССР, 1984. С. 71–78.
5. Богословский Б.Б., Филь С.А. Классификация водоемов по внешнему водообмену // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. М.: Изд-во АН СССР. Геогр. общество СССР, 1984. С. 54–60.
6. Винберг Г.Г. Значения новых методов лимнологического исследования для разработки типологии озер // Тр. V научной конференции по изучению внутренних вод Прибалтики. Минск, 1959. С. 5–13.
7. ГОСТ Р ИСО 16269-4–2017. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2017. 49 с.
8. Зотиков И.А., Даксбери Н.С. О генезисе озера Восток: Антарктида // Докл. РАН. 2000. Т. 370. № 6. С. 815–818.
9. Иванов П.В. Классификация озер по величине и по их средней глубине // Бюл. ЛГУ. 1948. № 21. С. 29–36.
10. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер различных природных зон. М.: Наука, 1984. 208 с.
11. Кочков Н.В., Рянжин С.В. Методика оценки морфометрических характеристик озер с использованием спутниковой информации // Водные ресурсы. 2016. Т. 43. № 1. С. 1–6.
12. Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю., Демнев А.Д. Уникальность карстового озера Церик-Кель (Голубое озеро) в Кабардино-Балкарии // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Петрозаводск, 2017. С. 92–98.
13. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Общая гидрология. М.: Высшая шк., 1991. 368 с.
14. Одум Ю. Экология. В 2-х томах. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с. Т. 2. 376 с.
15. Пармузин Ю.П. Генетическая классификация озерных котловин и схема районирования СССР по их родам // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 106–114.
16. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощьность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // Лед и снег. 2011. Вып. 1(113). С. 25–35.
17. Румянцев В.А., Дракцова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: Лема, 2015. 480 с.
18. Рянжин С.В. Создание WORLDLAKE – базы данных по озерам и водохранилищам мира для широких лимнологических исследований: Всерос. Юбил. конф. РФФИ Фундаментальные исследования взаимодействия суши, океана и атмосферы. М.: Макс Пресс, 2002. С. 239–240.
19. Сулин В.А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1948. 108 с.
20. Теоретические вопросы классификации озер / Отв. ред. Н.П. Смирнова. СПб.: Наука, 1993. 186 с.
21. Тимошкин О.А. Озеро Байкал: разнообразие фауны, проблемы ее несмешиваемости и происхождения, экология и “экзотические” сообщества // Аннотированный список фауны озера Байкал и его водосборного бассейна. Новосибирск: Наука, 2001. Т. 1, кн. 1. С. 16–73.
22. Тихомиров А.И. Классификация озер умеренной зоны по термическому режиму // Всесоюзный Симпозиум по основным проблемам пресноводных озер. Вильнюс, 1970. Т. 1. С. 174–185.
23. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22(2). P. 361–369.
24. Forel F.-A. Le Lemman. Monographie limnologique. Lausanne: F. Rouge, 1904. V. 3. 715 p.

25. *Hansen K.* The dystrophic lake type // *Hydrobiologia*. 1962. V. 19. P. 183–191.
26. *Horvatinčić N.* Starost sedre Plitvičkih jezera // *Priroda: mjesečnik za popularizaciju prirodnih znanosti i ekologije*. 1999. V. 89. P. 20–22.
27. *Hutchinson G.E.* A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1957. 1015 p.
28. *Hutchinson G.E., Löffler H.* The thermal classification of lakes // *Proceedings of the National Academy Sciences of the USA*. 1956. V. 42(2). P. 84–86.
29. *Kalff J.* Limnology: Inland Water Ecosystems. N.Y.: Prentice Hall, 2002. 593 p.
30. *Lake Tanganyika and its Life*. London: Oxford University Press, 1991. 354 p.
31. *Msukwa A.* Ecological Aspects of the Ornamental Fish of Lake Malawi and their Implications in Relation to Exploitation and Conservation // *Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium*. Malawi, 2001. P. 9–10.
32. *Murray J., Pullar L.* Bathymetrical Survey of the Scottish Fresh-Water Lochs. Edinburgh: Challenger Office, 1910. 658 p.
33. *Ngatunga B.* The need to maintain maximum biodiversity in Lake Nyasa, lessons drawn from other biodiversity disaster // *Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium*. Malawi, 2001. P. 6.
34. *Ochumba P.B.O., Kibaara D.I.* An instance of thermal instability in Lake Simbi, Kenya // *Hydrobiologia*. 1988. V. 158. P. 247–252.
35. *Ohle W.* Beitrage zur Produktionsbiologie der Gewasser // *Archiv für Hydrobiologie, Suppl.* 1955. V. 22(3/4). P. 456–479.
36. *Pasternack G.B., Varecamp J.C.* Volcanic lake systematics I. Physical constraints // *Bull. of Volcanology*. 1997. V. 58. № 7. P. 528–538.
37. *Pielou E.C.* Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and measure // *Amer. Natur.* 1966. V. 100. P. 463–465.
38. *Schwoerbel J.* Handbook of Limnology. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1987. 228 p.
39. *Shannon C.E., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.
40. *Simpson E.H.* Measurement of diversity. *Nature*, 1949. V. 163. 688 p.
41. *Whipple G.C.* Classifications of lakes according to temperature // *American Naturalist*. 1898. V. 32. P. 25–33.
42. *Yoshimura S.A.* A contribution to the knowledge of deep water temperature of Japanese lakes. Pt.1. Summer temperature Japan // *J. Astronomy & Geophysics*. 1936. V. 13. P. 20–61.

### Unique Lakes as an Object of Scientific Interest

Sh. R. Pozdnyakov<sup>1, \*</sup>, A. V. Izmailova<sup>1, \*\*</sup>, and A. M. Rasulova<sup>1, \*\*\*</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Limnology RAS, Saint Petersburg, Russia*

\*e-mail: [tbgmaster@mail.ru](mailto:tbgmaster@mail.ru)

\*\*e-mail: [ianna64@mail.ru](mailto:ianna64@mail.ru)

\*\*\*e-mail: [arasulova@gmail.com](mailto:arasulova@gmail.com)

As the network of specially protected natural areas develops and expands, the question of scientific substantiation often arises: is it possible to characterize this or that territory or water area as “unique”. Using the example of lake ecosystems it is proposed to consider the possibility of applying statistical approaches to such justification. Each lake ecosystem is different in its own way, however, in order to recognize its uniqueness, there must be a specific set of properties or characteristics indicating its exceptional nature. The article discusses the question of what kind of lakes can be considered as unique from a scientific perspective. It has been proposed to evaluate the uniqueness taking into account the analysis of samples constructed according to various characteristics (parameters) characterizing the lake ecosystems and the processes occurring in them. If all the lakes of the world are presented as a statistical aggregate with a set of characteristics (parameters) characterizing the lake ecosystems themselves and the processes occurring in them, then most of the samples built on these parameters based on real-world data can be described using theoretical distributions. At the same time, several parameters will have outliers that stand out drastically from the complete sample. Since the lake ecosystems are characterized by mutual dependence of the processes occurring in them, these outliers will be detected generally for the same units of the sample, i.e. for lakes that have abnormal values in a number of characteristics. At the same time, extreme values for one characteristic (parameter) can lead to the emergence of outliers in a

number of parameters. These lakes should be considered as unique in terms of a statistics. This approach allows to distinguish not only the extreme values of any parameter, but also the values drastically standing out of the sample. It is especially important due to the multiplicity of small local lake systems which can be distinguished only with this approach. The article also analyzes non-parameterizable features that may indicate the uniqueness of the lake, since to this day expert assessments remain the main way to determine uniqueness, although it must be recognized that they have a certain subjectivity.

*Keywords:* lake ecosystem, unique lakes, lake classifications, statistical aggregate, data analysis, outlier

## REFERENCES

1. *Alyokin O.A.* K voprosu o himicheskoj klassifikacii prirodnyh vod // Voprosy gidrohimii. Tr. NIU GUGMS. 1946. Ser. 4. Vyp. 32. S. 25–39.
2. *Baranov I.V.* Limnologicheskie tipy ozyor SSSR. L.: Gidrometeoizdat, 1962. 276 s.
3. *Berkin N.S., Makarov A.A., Rusinek O.T.* Bajkalovedenie: uchebnoe posobie. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo gos. un-ta, 2009. 291 s.
4. *Bogdanov V.V.* Zonal'no-regional'nye svoystva limnogeneza i ih rol' v klassifikacii i rajonirovanii ozyor // Geografo-gidrologicheskij metod issledovaniya vod sushi. L.: Izd-vo AN SSSR. Geogr. obshchestvo SSSR, 1984. S. 71–78.
5. *Bogoslovskij B.B., Fil' S.A.* Klassifikaciya vodoyomov po vneshnemu vodoobmenu // Geografo-gidrologicheskij metod issledovaniya vod sushi. M.: Izd-vo AN SSSR. Geogr. obshchestvo SSSR, 1984. S. 54–60.
6. *Vinberg G.G.* Znacheniya novyh metodov limnologicheskogo issledovaniya dlya razrabotki tipologii ozyor // Tr. V nauchnoj konferencii po izucheniyu vnutrennih vod Pribaltiki. Minsk, 1959. S. 5–13.
7. GOST R ISO 16269-4–2017. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. M.: Standartinform, 2017. 49 s.
8. *Zotikov I.A., Daksberi N.S.* O genezise ozera Vostok: Antarktida // Dokl. RAN. 2000. V. 370. № 6. S. 815–818.
9. *Ivanov P.V.* Klassifikaciya ozyor po velichine i po ih srednej glubine // Byul. LGU. 1948. № 21. S. 29–36.
10. *Kitaev S.P.* Ekologicheskie osnovy bioproduktivnosti ozyor razlichnyh prirodnyh zon. M.: Nauka, 1984. 208 s.
11. *Kochkov N.V., Ryzanzhin S.V.* Metodika ocenki morfometricheskikh harakteristik ozer s ispol'zovaniem sputnikovoj informacii // Vodnye resursy. 2016. V. 43. № 1. S. 1–6.
12. *Maksimovich N.G., Meshcheryakova O.Yu., Demenev A.D.* Unikal'nost' karstovogo ozera Cerik-Kyol' (Goluboe ozero) v Kabardino-Balkarii // Ozyora Evrazii: problemy i puti ih resheniya. Petrozavodsk, 2017. S. 92–98.
13. *Mihajlov V.N., Dobrovol'skij A.D.* Obshchaya gidrologiya. M.: Vysshaya shk., 1991. 368 s.
14. *Odum Yu.* Ekologiya. V 2-h tomah. M.: Mir, 1986. V. 1. 328 s. V. 2. 376 s.
15. *Parmuzin Yu.P.* Geneticheskaya klassifikaciya ozyornyh kotlovin i skhema rajonirovaniya SSSR po ih rodam // Krugovorot veshchestva i energii v ozyornyh vodoyomah. Novosibirsk: Nauka, 1975. S. 106–114.
16. *Popov S.V., Masolov V.N., Lukin V.V.* Ozero Vostok, Vostochnaya Antarktida: moshchnost' lednika, glubina ozyora, podlyodnyj i korennoj rel'ef // Lyod i sneg. 2011. Vyp. 1(113). S. 25–35.
17. *Rumyancev V.A., Drabkova V.G., Izmajlova A.V.* Ozyora evropejskoj chasti Rossii. SPb.: Lema, 2015. 480 s.
18. *Ryzanzhin S.V.* Sozdanie WORLDLAKE – bazy dannyh po ozeram i vodohranilishcham mira dlya shirokih limnologicheskikh issledovanij: Vseros. Yubil. konf. RFFI Fundamental'nye issledovaniya vzaimodejstviya sushi, okeana i atmosfery. M.: Maks Press, 2002. S. 239–240.
19. *Sulin V.A.* Usloviya obrazovaniya, osnovy klassifikacii i sostav prirodnyh vod. M.–L.: Izd. AN SSSR, 1948. 108 c.
20. Teoreticheskie voprosy klassifikacii ozyor / Otv. red. N.P. Smirnova. SPb.: Nauka, 1993. 186 s.
21. *Timoshkin O.A.* Ozero Bajkal: raznoobrazie fauny, problemy eyo nesmeshivaemosti i proiskhozhdeniya, ekologiya i "ekzoticheskie" soobshchestva // Annotirovannyj spisok fauny ozera Bajkal i ego vodosbornogo bassejna. Novosibirsk: Nauka, 2001. V. 1, kn. 1. S. 16–73.
22. *Tihomirov A.I.* Klassifikaciya ozyor umerennoj zony po termicheskomu rezhimu // Vsesoyuznyj Simpozium po osnovnym problemam presnovodnyh ozyor. Vil'nyus, 1970. V. 1. S. 174–185.
23. *Carlson R.E.* A trophic state index for lakes // Limnology and Oceanography. 1977. V. 22(2). P. 361–369.
24. *Forel F.-A.* Le Lemán. Monographie limnologique. Lausanne: F. Rouge, 1904. V. 3. 715 p.
25. *Hansen K.* The dystrophic lake type // Hydrobiologia. 1962. V. 19. P. 183–191.

26. *Horvatinčić N.* Starost sedre Plitvičkih jezera // Priroda: mjesečnik za popularizaciju prirodnih znanosti i ekologije. 1999. V. 89. P. 20–22.
27. *Hutchinson G.E.* A treatise on limnology. Vol. 1. Geography, Physics and Chemistry. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1957. 1015 p.
28. *Hutchinson G.E., Löffler H.* The thermal classification of lakes // Proceedings of the National Academy Sciences of the USA. 1956. V. 42(2). P. 84–86.
29. *Kalff J.* Limnology: Inland Water Ecosystems. N.Y.: Prentice Hall, 2002. 593 p.
30. Lake Tanganyika and its Life. London: Oxford University Press, 1991. 354 p.
31. *Masukwa A.* Ecological Aspects of the Ornamental Fish of Lake Malawi and their Implications in Relation to Exploitation and Conservation // Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium. Malawi, 2001. P. 9–10.
32. *Murray J., Pullar L.* Bathymetrical Survey of the Scottish Fresh-Water Lochs. Edinburgh: Challenger Office, 1910. 658 p.
33. *Ngatunga B.* The need to maintain maximum biodiversity in Lake Nyasa, lessons drawn from other biodiversity disaster // Proceeding of Lake Malawi fisheries management symposium. Malawi, 2001. P. 6.
34. *Ochumba P.B.O., Kibaara D.I.* An instance of thermal instability in Lake Simbi, Kenya // Hydrobiologia. 1988. V. 158. P. 247–252.
35. *Ohle W.* Beitrage zur Produktionsbiologie der Gewasser // Archiv fur Hydrobiologie, Suppl. 1955. V. 22(3/4). P. 456–479.
36. *Pasternack G.B., Varecamp J.C.* Volcanic lake systematics I. Physical constraints // Bull. of Volcanology. 1997. V. 58. № 7. P. 528–538.
37. *Pielou E.C.* Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and measure // Amer. Natur. 1966. V. 100. P. 463–465.
38. *Schwoerbel J.* Handbook of Limnology. N.Y.: J. Wiley & Sons, 1987. 228 p.
39. *Shannon C.E., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. Urbana: Univ. Illinois Press, 1949. 117 p.
40. *Simpson E.H.* Measurement of diversity. Nature. 1949. V. 163. 688 p.
41. *Whipple G.C.* Classifications of lakes according to temperature // American Naturalist. 1898. V. 32. P. 25–33.
42. *Yoshimura S.A.* A contribution to the knowledge of deep water temperature of Japanese lakes. Pt.1. Summer temperature Japan // J. Astronomy & Geophysics. 1936. V. 13. P. 20–61.