

УДК 574.635

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КЛАССИФИКАЦИИ КАРСТОВЫХ ОЗЕР

Л.Л. Фролова, А.Г. Закиров

Аннотация

Данная работа посвящена анализу показателей состояния карстовых озер Среднего Поволжья. Статистическая обработка проведена для пятидесяти показателей экологического состояния карстовых озер. Проанализированы тип распределения, основные статистические характеристики этих показателей и предложен формализованный подход к выбору показателей для классификации карстовых озер на основе статистической оценки их взаимосвязей.

Введение

Территория Среднего Поволжья представляет собой зону классического расположения карста: здесь встречаются разнообразные карстовые озера как по форме, так и по гидрохимическому режиму в силу особенностей подземного питания [1]. Среди карстовых озер различают сточные и проточные, формирующиеся под воздействием аazonальных факторов, и бессточные, испытывающие большее влияние зональных климатических факторов. Абиотические параметры озер весьма разнообразны: по площади водного зеркала они изменяются от 0.1 га (Акташский Провал) до 138 га (Кабан Средний), по средней глубине – от 0.3 м (Старица кв. 14–15) до 28 м (Акташский Провал), по объему – от 2.4 тыс. куб. м (Голубое Малое-1) до 2815.3 тыс. куб. м (Глухое), по площади мелководий – от 7% (Кошаер) до 100% (Старица кв. 14–15), по общей минерализации – от 20 мг/л (Кошаер) до 4504.5 мг/л (Соленое) [2].

Карстовые озера заслуживают самого пристального внимания, изучения и охраны как индикаторы экологического состояния территории бассейна. Эти природные объекты присутствуют во всех географических зонах Среднего Поволжья. Очень важным представляется изучение типологии и особенностей экологического развития карстовых озер под воздействием антропогенных факторов. Существующие классификации озер, построенные в основном по гидрологическому, гидрохимическому режимам или трофическим признакам, не учитывают взаимосвязи показателей [3, 4].

Данная работа посвящена выявлению значимых взаимосвязей показателей состояния карстовых озер и применению формализованного подхода к выбору показателей для их классификации.

Статистическая оценка распределений показателей

Морфометрические, гидрологические, гидрохимические и гидробиологические данные представлены в базе данных 50 показателями состояния по 71 карстовому озеру Среднего Поволжья [5].

В целях оценки дальнейшего использования этих показателей для классификации карстовых озерных экосистем проведена статистическая обработка данных с использованием статистического пакета Statgraphics Plus 2.1:

- проверка на возможность описания экспериментальной выборки параметрическим распределением: нормальным (НР) и логнормальным (ЛНР) с помощью тестов: скорректированный χ^2 , тест Шапиро – Уилкса, тесты для малых выборок;
- по каждому показателю, описываемому нормальным распределением, вычислены размер выборки n , среднее значение \bar{X} , выборочное стандартное отклонение S_x , коэффициент вариации C_v ;
- по каждому показателю, описываемому логнормальным распределением, вычислены размер выборки n , среднее значение логарифмов данных \overline{LX} , выборочное стандартное отклонение логарифмов данных LS_x , коэффициент вариации логарифмов данных LC_v , вычислено среднее значение \bar{X}_l , соответствующее значению \overline{LX} .

Результаты статистической обработки данных приведены в табл. 1–3.

Из 50 показателей карстовых водоемов может быть описано нормальным распределением с вероятностью 95% только 7 показателей (табл. 1), логнормальным – 11 показателей (табл. 2). Остальные 32 показателя не описываются нормальным распределением (табл. 3).

Шесть показателей из семи, описываемых нормальным распределением имеют биологический смысл: индекс сапробности по бентосу, индекс Шеннона, индекс Симпсона, количество видов диатомовых водорослей, количество видов икhtiофауны, общее количество видов водорослей. Один показатель, средняя ширина водоема, относится к геоморфологическим характеристикам.

Шесть показателей из 11, описываемых логнормальным распределением имеют биологический смысл: доля площади акватории, занятая высшей водной растительностью, индекс Вудивисса, количество видов сине-зеленых водорослей, количество видов зеленых водорослей, количество видов коловраток и прозрачность. Пять показателей отражают геоморфологические свойства водоемов: длина береговой линии, коэффициент открытости, объем водоема, максимальная ширина и длина.

Результаты расчетов показывают, что большинство показателей состояния карстовых озер не описывается нормальным распределением. При работе с показателями, не описываемыми нормальным распределением, следует использовать непараметрические методы анализа данных, а также учитывать возможность появления нелинейных шкал при градации каких-либо свойств объекта по этим показателям. Если выборка не может быть описана параметрическим распределением на момент статистической обработки данных, то это свидетельствует только о том, что необходимо проведение дополнительных исследова-

Табл. 1

Статистические оценки показателей, описываемых нормальным распределением

Показатель	n	\bar{X}	S_x	C_v
Индекс сапробности по бентосу	12	2.30	0.56	0.24
Индекс Шеннона (H)	12	1.96	0.50	0.26
Индекс Симпсона (Ds)	12	0.67	0.10	0.16
Количество видов диатомовых водорослей	24	7.70	4.54	0.59
Количество видов ихтиофауны	26	4.30	2.21	0.51
Общее количество видов водорослей	27	31.70	26.01	0.82
Средняя ширина, м	63	186.7	116.06	0.62

Табл. 2

Статистические оценки показателей, описываемых логнормальным распределением

Показатель	n	\overline{LX}	LS_x	LC_v	\bar{X}_l
Доля площади акватории, занятая высшей водной растительностью, %	14	0.81	0.48	0.59	6.46
Индекс Вудивисса	17	0.59	0.18	0.31	3.85
Количество видов сине-зеленых водорослей	26	0.63	0.35	0.56	4.23
Количество видов зеленых водорослей	34	1.005	0.435	0.432	10.11
Количество видов коловраток	44	0.91	0.31	0.34	8.07
Прозрачность, см	57	1.22	0.41	0.34	16.64
Длина береговой линии, м	63	3.16	0.45	0.14	1438
Коэффициент открытости	65	1.3	0.6	0.5	2.0
Объем водоема, тыс. куб. м	65	2.52	0.88	0.35	329.72
Максимальная ширина, м	68	2.3	0.4	0.2	193.3
Длина, м	69	2.7	0.45	0.17	507.9

дований, в результате чего могут измениться тип распределения и суммарные статистические оценки показателей. Таким образом, для целей классификации следует учитывать не столько тип распределения показателей, сколько их вариабельность. Так, показатели, описываемые нормальным распределением, но имеющие варьирование с коэффициентом вариации C_v или LC_v , значительно превышающим 0.25, не могут быть использованы как классификационные признаки.

Оценка взаимосвязей показателей

Для классификации необходимо выбрать минимальный набор показателей, наиболее полно описывающих экологическое состояние озерных экосистем. Такой выбор можно осуществить следующим образом: зависимые показатели сгруппировать в независимые кластеры, из которых затем выбрать по одному показателю, имеющему ясный экологический смысл и легко измеряемому.

Табл. 3

Показатели, не описываемые нормальным распределением

Показатель	<i>n</i>
Количество видов пиропитовых водорослей	11
Олигохетный индекс, %	12
Индекс Пиелу по бентосу	12
Количество видов золотистых водорослей	18
Количество видов эвгленовых водорослей	24
Уровень биогенной (N,P) нагрузки	29
Количество видов веслоногих	29
Суммарный азот, т/год	30
Азот общий удельный, г/кв. м·год	30
Концентрация общего азота, г/куб. м·год	30
Суммарный фосфор, т/год	30
Фосфор общий удельный, г/кв. м·год	30
Концентрация общего фосфора, г/куб. м·год	30
Количество видов ветвистоусых	30
Уровень фосфорной нагрузки	31
Общее количество видов зоопланктона	31
Термическая устойчивость	44
Термическая устойчивость максимальная	44
Площадь мелководий, %	51
Минерализация общая, мг/л	51
Средняя глубина (Нср), м	62
Коэффициент емкости (Нср/Нмакс)	62
Коэффициент удлиненности (Длина/Средняя ширина)	63
Максимальная глубина (Нмакс), м	64
Биомасса ветвистоусых ракообразных, г/куб. м	65
Биомасса веслоногих, г/куб. м	65
Биомасса коловраток, г/куб. м	65
Биомасса зоопланктона общая, г/куб. м	65
Численность ветвистоусых ракообразных, тыс. экз./куб. м	65
Численность веслоногих, тыс. экз./куб. м	65
Численность коловраток, тыс. экз./куб. м	65
Численность зоопланктона общая, тыс. экз./куб. м	65
Площадь водоема, га	65

Учитывая отсутствие у подавляющего большинства числовых данных явного параметрического распределения, для проведения соответствующих расчетов использован метод глобальной кластеризации, который не предполагает какого-либо типа распределения данных и позволяет выделять кластеры с одинаково варьирующими значениями [6].

Критерием выделения кластеров является достижение минимума функционала, представляющего собой сумму вторых центральных моментов кластеров:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^{k_1} \sum_{t=1}^{k_2} \sum_{\substack{j \in G_s \\ I \in R_s}} (x_{ij} - \bar{x}_{ts})^2,$$

где N – количество значений показателей во всех кластерах всех групп параметров; k_1 – число групп параметров; s – номер группы параметров; k_2^s – число кластеров s -й группы параметров; t – номер кластера; j – номер параметра в s -й группе параметров; i – номер значения показателя в j -й группе; G_s – s -я группа параметров; \mathfrak{R}_{ts} – подмножество значений показателя t -го кластера в s -й группе параметров; x_{ij} – i -е значение показателя j -го параметра; \bar{x}_{ts} – среднее t -го кластера s -й группы параметров.

При использовании функционала для выделения кластеров предполагается, что одинаково варьирующиеся характеристики природных объектов имеют сходные закономерности своего формирования. Иначе говоря, если закономерности формирования какой-то группы характеристик сходны, то и варьирование их сходно.

Результатом глобальной кластеризации является выделение групп показателей карстовых озер, варьирующихся одинаковым образом, и набор кластеров, в которые объединяются конкретные показатели с определенным диапазоном значений. Таким образом, получаем как группы одинаково варьирующихся показателей, так и диапазоны значений этих показателей, в пределах которых это варьирование сходно.

Результаты

Расчеты на имеющемся наборе данных показали, что числовые показатели карстовых озер образуют пять устойчивых независимых групп. Состав групп приведен в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что получено пять групп с 11 показателями состояния озер. Группы ранжированы по значению функционала от минимального до максимального. Наиболее статистически устойчивая группа имеет минимальное значение функционала.

Группы характеризуются следующими свойствами:

- первая группа включает три показателя, имеющих максимальные взаимосвязи из этих пяти групп по значению функционала $I = 0.608$. Любой из этих трех показателей может быть выбран для классификации;
- вторая, третья и четвертая группы включают, соответственно, один, два, один показателей, полученных по данным только 12 озер. Статистическая устойчивость оценки этих показателей будет повышаться по мере накопления данных. Показатели в этих трех группах представляют интерес, потому что в основном они описываются параметрическим распределением и явно связаны с биотической составляющей экосистемы. Значение функционала изменяется в пределах от 0.764 до 0.800;
- пятая группа включает четыре показателя, имеющих минимальные взаимосвязи из этих пяти групп по значению функционала $I = 0.930$. Несмотря на это, показатели этой группы могут быть использованы для классификации при отсутствии показателей из первых четырех (1–4) групп или в дополнение к этим группам.

Табл. 4

Устойчивые группы показателей карстовых озер

Группы	1	2	3	4	5
I	0.608	0.764	0.792	0.800	0.930
Показатели	Средняя глубина Площадь мелководий Коэффициент емкости	Индекс Шеннона	Индекс Пиелу Индекс сапробности по бентосу	Индекс Симпсона	Максимальная глубина Средняя ширина Термическая устойчивость Индекс Вудивисса

Табл. 5

Статистические оценки групповых показателей

Номер группы	Показатель	n	μ_1	μ_2^c	A_s	E_x	C_v	Тип распределения
1	Средняя глубина, м	62	5.6	16.5	2.78	11.8	0.73	Нет
	Площадь мелководий	51	36.0	720.0	1.16	0.03	0.75	Нет
	Коэффициент емкости	62	0.407	0.021	0.43	0.20	0.36	Нет
2	Индекс Шеннона	12	1.96	0.50	0.57	0.46	0.26	<i>N</i>
3	Индекс Пиелу	12	2.82	0.153	-2.1	5.6	0.14	Нет
	Индекс сапробности по бентосу	12	2.30	0.56	0.82	0.71	0.24	<i>N</i>
4	Индекс Симпсона	12	0.67	0.10	-0.15	-0.67	0.16	<i>N</i>
5	Максимальная глубина, м	64	14.3	82.0	1.23	1.77	0.63	Нет
	Средняя ширина, м	63	186.7	116	0.76	0.22	0.62	<i>N</i>
	Термическая устойчивость максимальная	44	12.0	86.5	1.34	1.83	0.78	Нет
	Индекс Вудивисса	17	0.59	0.18	-0.24	-1.16	0.31	<i>LN</i>

Для всех групповых показателей определены следующие статистические оценки: объем выборки n ; центр распределения (первый начальный момент) μ_1 , равный \bar{X} и \overline{LX} для нормального и логнормального распределения соответственно; варьирование (второй центральный момент) μ_2^c , асимметрия (коэффициент асимметрии) A_s , эксцесс (показатель эксцесса) E_x , коэффициент вариации C_v , тип распределения (N – нормальное распределение, LN – логнормальное распределение, «Нет» – отличное от N и LN распределения). Статистические оценки групповых показателей приведены в табл. 5.

Показатели, входящие в одну группу, связаны между собой, и поэтому целесообразно использовать по одному показателю от каждой группы для классификации карстовых озер. Эти показатели выделены полужирным шрифтом в табл. 5.

Выводы

Статистическая обработка данных по карстовым озерам Среднего Поволжья показывает, что из всего разнообразия показателей, измеряемых при обследовании этих озер, для функционально значимой классификации можно использовать пять независимых показателей из набора в 11 показателей. При этом следует брать показатели, входящие в разные группы. Для классификации карстовых озер на основе статистической оценки устойчивости их взаимосвязей предложены следующие показатели:

1. коэффициент емкости;
2. индекс Шеннона;
3. индекс сапробности по бентосу;
4. индекс Симпсона;
5. индекс Вудивисса.

В этом наборе присутствуют показатели, соответствующие различным аспектам биотической составляющей озерной экосистемы (индексы Шеннона, сапробности по бентосу, Симпсона и Вудивисса), и показатель, соответствующий абиотической составляющей той же экосистемы (коэффициент емкости). Все эти показатели имеют ясный экологический смысл и могут быть легко измерены. Предложенный список показателей носит предварительный характер и нуждается в дальнейшем уточнении полученных результатов на основе данных дополнительных исследований.

В любом случае формализованный выбор показателей классификации не заменяет, а предполагает содержательную экологическую интерпретацию как самих показателей, так и результатов классификации.

Авторы выражают глубокую благодарность доктору биологических наук, профессору экологического факультета, заведующей лабораторией водных экосистем Н.М. Мингазовой за предоставление данных по карстовым озерам.

Summary

L.L. Frolova, A.G. Zakirov. Analysis of attribute relationships for karst lakes classification.

Fifty lake characteristics are statistically evaluated for use as possible criteria to classify conditions of karst lakes. Preliminary results identify five groups involving eleven parameters, which can be used as statistically stable indicators in classification. They include both typology and ecological characteristics.

Литература

1. *Ступинин А.В.* Равнинный карст и закономерности его развития на примере Среднего Поволжья. – Казань: Казан. гос. ун-т, 1967.

2. *Сорокин И.Н., Петрова Р.С.* Озера Среднего Поволжья. – Л.: Наука, 1976.
3. *Смирнов Н.П.* Теоретические вопросы классификации озер. – СПб.: Наука, 1993.
4. *Frolova L.L.* Fuzzy boundaries of ranges in classification of water quality to multipurpose use // International mitigation and prevention of land desertification. – Bled, 2002. – P. 104–105.
5. Уникальные экосистемы солоноватоводных карстовых озер Среднего Поволжья / Под ред. А.Ф. Алимова, Н.М. Мингазовой. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2001. – 252 с.
6. *Королева Т.Э., Закиров А.Г.* О возможности группировки природных объектов методом глобальной кластеризации // Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки. – 1999. – Т. 4, Вып. 3. – С. 383–384.

Поступила в редакцию
22.05.06

Фролова Людмила Леонидовна – кандидат технических наук, доцент кафедры генетики Казанского государственного университета.

E-mail: *Lucy.Frolova@ksu.ru*

Закиров Альфред Газизович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, инженер кафедры генетики Казанского государственного университета.

E-mail: *Alfred.Zakirov@ksu.ru*