

ВЛИЯНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЗЕР НА ТРОФИЧЕСКИЙ СТАТУС ЛИМНОСИСТЕМ (РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД)

В современных условиях все большее внимание привлекает проблема рационального использования, охраны и восстановления ресурсов озерного фонда. Озеро — водоем замедленного водообмена, часть гидрографической сети и участвует в общем круговороте воды. Озеро вместе со своим водосбором является сложной системой, включающей ряд разнородных элементов — гидрологических, химических, биологических и седиментационных.

В 30-е годы XX в. Г. Ю. Верещагин [1] указал на определяющую роль морфометрии и морфологии котловины озера в лимнических процессах. Развитием этого подхода к изучению лимнических процессов занимались многие лимнологи [2–7]. В настоящее время накоплено значительное количество информации об озерных котловинах и их генезисе, и поэтому представляется актуальным совершенствование оценок взаимосвязи морфогенетических и лимноэкологических характеристик водоемов.

Озера служат накопительными системами, и со временем их котловины заполняются донными отложениями, что приводит к изменению не только форм котловин озера, но и их лимноэкологических характеристик. Потому применение исторического метода исследования окружающей среды объективно является необходимым инструментом географических исследований для познания динамики природных процессов [8]. Изучение процессов седиментации в озерах и скоростей осадконакопления позволяет выявить закономерности в варьировании морфометрических характеристик и последующих изменений трофического статуса озера.

Трофическая типизация озерных экосистем основывается на оценке уровня биологической продуктивности как главной функциональной характеристики водоема. Трофический тип водоема — это интегральная и многомерная характеристика, определяемая множеством взаимосвязанных процессов физической, химической и биологической природы. Определение трофического статуса, как правило, включает использование комплексов признаков, дополняющих друг друга, но существуют трофические типизации озера, базирующиеся на небольшом числе показателей или даже одном (табл. 1), наиболее информативном, к которым, бесспорно, отнесится величина первичной продукции как мера интенсивности процесса новообразования органического вещества в водоеме — основы всей трофической пирамиды. Уровень биологической продуктивности озера всегда связывается с вполне конкретными лимническими параметрами того или иного трофического типа, а также с характером водосбора, особенностями гидрографической сети, притоком тепла и другими компонентами, объединенными в единый комплекс как внутри водоема, так и в системе «водосбор — озеро» [9]. Оценка уровня биологической продуктивности определяет не только положение водоема в эволюционном ряду, но и характер структурно-функциональной организации экосистемы, т. е. специфику взаимосвязей слагающих ее компонентов.

В настоящее время используются многие классификационные шкалы, которые построены на основе показателей, относящихся к различным компонентам водных экосистем (см. табл. 1). Основоположниками первой трофической типизации озерных экосистем, как известно, являются Тиннеман и Науман. Ими была предложена принятая впоследствии терминология разделения озера на олиго-, мезо-, эв- и дистрофные. Подчеркивая комплексность характеристики трофического типа озера, они убедительно показали, что уровень биологической продуктивности (трофия) тесно связан с абиотическими факторами среды, географическим положением

Таблица 1. Некоторые показатели трофического статуса озерных экосистем (по [19] с добавлениями автора)

Показатель	Характеристики озер ВВП		Автор классификации	Трофический тип озера		
	Среднее	Минимум		Максимум	Олиготрофный	Мезотрофный
Сорг, мг/л	17,0	5,6	33,4	1,7-6,0		
$СН_4$, мг/м ³	26,5	4,5	70,9	0,1-1 <1,5-3	1-10 3-12	10-100 >12-48
$V_{зоо}$, г/м ³	5,4	0,4	26,9	<0,5-1	1-4	>4-16
$V_{фито}$, г/м ³	6,5	0,4	38,3	<1,5 <0,5-1	1,5-2 1-4	>2-6 >4-16
$V_{зоо}/V_{фито}$	1,3	0,2	4,1	>4:1	1:1	<0,5:1
$Ч_{зоо}$, 10 ⁵ /м ²				1	3	8
Численность бактериопланктона, млн кл./л				<1	1-2	>2-3
Индекс видового разнообразия на основе величин биомассы				0,05-0,5	0,5-2	2-15
				4,0-2,6	2,5-2,1	<2,0-1,0

Примечание. Здесь и далее: Z — абсолютная высота (м), A — площадь зеркала озера (км²), V — объем озера (км³), H_{avg} — средняя глубина (м), H_{max} — максимальная глубина (м), W — максимальная ширина (м), L — длина озера (км), RT — время водообмена (годы), S — площадь водосбора (км²), $Сорг$ — концентрация органического углерода (мг/л), $R_{мин}$ — содержание фосфора минерального (мг/л), $R_{общ}$ — содержание фосфора общего (мг/л), $N_{аммон}$ — азот аммонийный (мг/л), $N_{нитрат}$ — азот нитратный (мг/л), $СМ$ — хлорофилл «а» (мг/л), $V_{зоо}$ — биомасса зоопланктона (г/м³), $V_{фито}$ — биомасса фитопланктона (г/м³), $V_{зоо}/V_{фито}$ — отношение биомассы зоопланктона к биомассе фитопланктона, Цр — цветность (град.), $R_{зоо}$ — видовое разнообразие зоопланктона, $R_{фито}$ — видовое разнообразие фитопланктона, $Ч_{зоо}$ — численность зоопланктона (тыс. экз./м³), $Ч_{фито}$ — численность фитопланктона (тыс. кл./л).

водоема и типом водосбора (субальпийский и альпийский). Характеристика трофического типа водоема Тинемапом и Наумапом строится на связи биологических показателей с абиотическими факторами среды — средней и максимальной глубинами, цветом воды, прозрачностью, гиполимниальным дефицитом O_2 , pH и др.

Прозрачность воды по диску Секки, начиная с Тинемана и Наумана, применялась как показатель трофического типа озер в натуральных классификационных шкалах. Прозрачность воды — это интегральная характеристика, результирующая множества процессов, связанных, в частности, с развитием планктонных сообществ, дающая информацию об общем содержании sestона, включающего взвешенное органическое вещество как автохтонного, так и аллохтонного происхождения. Возможность дистанционного определения прозрачности увеличивает перспективность ее использования для определения трофического статуса и качества воды.

С. П. Китаев [10] по величине отношения прозрачности к средней глубине делит озера на 5 групп — от «оптически очень мелководных» до «оптически очень глубоких». Крайние группы соответствуют эвтрофным и олиготрофным озерам, промежуточные — мезотрофным.

О. Ф. Якушко [6] предложила в качестве основы комплексной лимнологической географической классификации озер использовать связь максимальной глубины H_{max} с экологическим статусом водоема. Она подразделяет озера по биологическим и гидрохимическим показателям на 4 группы: глубокие, мезотрофные с признаками олиготрофии ($H_{max} > 25$ м); среднеглубокие мезотрофные (20 м $< H_{max} < 25$ м); неглубокие, эвтрофные (5 м $< H_{max} < 20$ м); мелководные, дистрофирующие ($H_{max} < 5$ м).

Для регионального изучения влияния морфометрических показателей озер на экологическое состояние экосистем была выбрана территория Водлозерского национального парка (ВНП), для которой автором настоящей работы собраны и проанализированы доступные данные по морфометрическим и экологическим характеристикам озер [11, 12]. На территории ВНП в относительно однородных природных условиях сконцентрировано большое количество озер единого происхождения, но с различными морфометрическими параметрами, что позволяет решать задачу оценки влияния морфометрических особенностей озер на структуру и функционирование водных экосистем в целом, а также на характер и интенсивность процесса естественной эвтрофикации водоемов.

Основные черты морфометрии и условий зарастания были рассмотрены для 19 озер в бассейне р. Илекты. Параметры этих озер указаны в табл. 2. На основе проанализированных литературных и натурных данных морфометрических и биологических показателей озер ВНП были рассчитаны корреляционные связи между ними. Полученная корреляционная матрица связи 9 морфометрических и 14 экологических параметров, используемых для определения трофического статуса озерных экосистем, свидетельствует о наличии устойчивой значимой связи между биопродуктивностью, морфометрическими и гидрологическими параметрами. В настоящей статье представлена часть корреляционной матрицы со статистически значимыми коэффициентами корреляции (табл. 3).

Для некоторых характеристик связь линейна и положительна, для других — наоборот. Значимые парные коэффициенты корреляции получены между количеством органического вещества и максимальной и средней глубинами. Чем больше глубины озер, тем меньше количество органического вещества содержится в их воде, что подтверждает классификацию О. Ф. Якушко. Высокие коэффициенты корреляции для озер ВНП между разнообразием фитопланктона и площадью озер, разнообразием зоопланктона и объемом озер свидетельствуют о том, что для крупных озер свойственно большее разнообразие фито- и зоопланктона. С возрастанием максимальной глубины численность зоопланктона уменьшается. Чем больше абсолютная высота озера, тем меньше содержится в озерной воде аммонийного азота, что подтверждает влияние площади водосбора на экологические показатели лимносистем.

Комплексное исследование водосмов ВНП указывает на значительное многообразие изученных озер как по морфометрическим характеристикам, так и по уровню их трофий. По содержанию биогенных элементов, качественному составу и количественным показателям планктонных ценозов озера имеют различный статус трофности (см. табл. 1), со всем диапазо-

Таблица 2. Статистические характеристики озер ВНП

Характеристика	Количество данных	Среднее	Минимум	Максимум	Среднее квадратич. отклонение
Z	19	167,4	136,0	203,0	13,9
V	13	2211,4	1,5	18546,5	5046,2
A	19	18,5	1,0	256,0	57,9
L	19	5,5	1,6	36,5	8,0
W	19	2,6	0,8	15,0	3,1
H _{max}	14	3,1	1,1	16,0	3,8
H _{avg}	14	1,2	0,5	3,5	0,8
C	16	992,3	2,9	5299,0	1555,0
RT	12	23,5	0,4	161,4	45,5
C _{орг}	14	17,0	5,6	33,4	7,4
R _{мин}	16	0,0	0,0	0,0	0,0
R _{общ}	15	0,1	0,0	0,2	0,1
N _{аммон}	15	0,1	0,0	0,4	0,1
N _{нитрит}	15	0,0	0,0	0,0	0,0
Chl	13	26,5	4,5	70,9	21,8
B _{зoo}	16	5,4	0,4	26,9	6,4
B _{фито}	16	6,5	0,4	38,3	9,4
B _{зoo} /B _{фито}	16	1,3	0,2	4,1	1,1
Цв	13	64,1	6,6	137,0	42,7
R _{зoo}	15	17,3	12,0	33,0	4,9
R _{фито}	16	37,4	12,0	89,0	18,7
Ч _{зoo}	16	535,9	39,1	5104,4	1225,3
Ч _{фито}	15	48341,3	570,0	328536,0	105591,0

Таблица 3. Корреляционная матрица для озер Водлозерского национального парка: зависимость биопродуктивности и биомассы гидробионтов от параметров, характеризующих форму котловины (уровень значимости $p < 0,05$)

	Z	V	A	H _{max}	H _{avg}	C _{орг}	N _{аммон}	R _{зoo}	R _{фито}	Ч _{зoo}
Z		-0,29	-0,30	-0,10	0,30	-0,45	-0,72	0,03	-0,19	-0,44
V	-0,29		0,89	0,06	-0,10	-0,01	0,53	0,77	0,60	-0,09
A	-0,30	0,89		0,07	-0,18	-0,02	0,47	0,68	0,71	-0,05
H _{max}	-0,10	0,06	0,07		0,75	-0,76	-0,27	-0,29	-0,12	-0,73
H _{avg}	0,30	-0,10	-0,18	0,75		-0,77	-0,41	-0,13	0,01	-0,59
C _{орг}	-0,45	-0,01	-0,02	-0,76	-0,77		0,38	0,22	0,11	0,76
N _{аммон}	-0,72	0,53	0,47	-0,27	-0,41	0,38		0,27	0,43	0,65
R _{зoo}	0,03	0,77	0,68	-0,29	-0,13	0,22	0,27		0,79	0,13
R _{фито}	-0,19	0,60	0,71	-0,12	0,01	0,11	0,43	0,79		0,32
Ч _{зoo}	-0,44	-0,09	-0,05	-0,73	-0,59	0,76	0,65	0,13	0,32	

Примечание. Выделены статистически значимые коэффициенты корреляции.

ном значений от очень низкого до высокого. При этом следует отметить повышенный уровень трофности большинства водоемов, который обусловлен их малыми средними глубинами (1,2 м в среднем) и незначительными объемами. По средним значениям концентрации органического углерода (17,0 мг/л), содержанию хлорофилла «а» (26,5 мг/м³), биомассе фито- (6,5 г/м³) и зоопланктона (5,4 г/м³) исследуемые озера ВНП относятся к эвтрофному типу. Минималь-

ные величины этих показателей трофического статуса некоторых озер свидетельствуют об олиго- и мезотрофном статусе их экосистем (например, концентрация органического углерода — 5,6 мг/л, содержание хлорофилла «а» — 4,5 мг/м³, биомассы фито- и зоопланктона — по 0,4 г/м³).

Таким образом, на региональном уровне, на примере озер ВНП, выявлена устойчивая качественная связь между биопродуктивностью, морфометрическими и гидрологическими параметрами. Развитие таких исследований для озер других регионов с иными морфометрическими, климатическими и экологическими характеристиками является перспективным направлением в лимнологии.

Summary

Antonova R. V. The influence of lake morphometric parameters on the trophic status of limnosystems.

This paper is focused on showing up quantitative relationships between morphometric and ecological characteristics of 19 lakes of Vodlozero National Park (Karelia, Russia). The lakes are not subject to the anthropogenous impact and have various limnetic characteristics. The lakes' trophic status is determined on the basis of the ecosystem classification. Significant correlation between the trophic status and the form of lakes are obtained.

Литература

1. *Верещагин Г.Ю.* Методы морфологической характеристики озер // Труды. Олонец. науч. экспедиции. Л., 1930. Ч. 2, вып. 1.
2. *Hutchinson G.E.* A treatise on limnology. Vol. 1: Geography, physics and chemistry. New York; London, 1957.
3. *Богословский Б.Б.* Озероведение. М., 1960.
4. *Россолимо Л.Л.* Основы типизации озер и лимнологического районирования // Накопление вещества в озерах / Под ред. Л.Л. Россолимо. М., 1964.
5. *Форш Л.Ф.* Термический режим, тепловой баланс озер и роль иловой толщи в их тепловом бюджете // Озера различных ландшафтов Севера-Запада СССР / Под ред. Л.Ф. Форш. Л., 1968. Ч. 1.
6. *Якушко О.Ф.* Белорусское поозерье. Минск, 1975.
7. *Сорокин И.Н.* Морфологические, морфометрические и гидрологические показатели и их роль в комплексной классификации озер и районирования // Теоретические вопросы классификации озер / Ред. Н. П. Смирнова. СПб., 1993.
8. *Севастьянов Д.В., Субетто Д.А., Арсланов Х.А.* и др. Процессы седиментации в озerno-болотных геосистемах северо-западного Приладожья // Изв. Русск. геогр. об-ва. 1996. Т. 128, вып. 5.
9. *Андроникова И.Н.* Классификация озер по уровню биологической продуктивности // Теоретические вопросы классификации озер / Ред. Н. П. Смирнова. СПб., 1993.
10. *Китаев С.П.* Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. М., 1984.
11. *Вислянская И.Г., Куликова Т.П., Литвиненко А.В., Мартынова Н.И.* Современное состояние озерных экосистем бассейна реки Илексы // Природно-культурное наследие Водлозерского национального парка / Под ред. В. С. Куликова. Петрозаводск, 1995.
12. *Антонова Р.В.* Влияние морфометрии озерных котловин на состояние озерных экосистем (на примере озер бассейна р. Илексы) // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7: Геология, география. 2001. Вып. 4 (№ 31).

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2002 г.