

Бесплатно.

ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ДРУЖБЫ НАРОДОВ
АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ГИДРОБИОЛОГИИ

На правах рукописи

ЖУКОВА Татьяна Васильевна

УДК 574.52+504.455.058(476.1)

**РОЛЬ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ
В БИОТИЧЕСКОМ КРУГОВОРОТЕ
И Евтрофировании Нарочанских озер**

03.00.18 — гидробиология

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Киев 1987

Работа выполнена в Проблемной НИИ экспериментальной биологии Белорусского государственного университета имени В.И.Ленина

Научный руководитель — кандидат биологических наук
А.П.Остапеня

Официальные оппоненты — доктор биологических наук
Л.Н.Зимбалевская,
кандидат географических наук
М.В.Мартынова

Ведущее учреждение — Институт озерадения АН СССР

Защита состо
на заседании
Института ги
252210,

С диссе
тута гидроби

Автореф

спе
канд

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. Биогенные вещества, в первую очередь соединения фосфора и азота, являются материальной основой биотического круговорота и ведущим фактором в евтрофировании водоемов. Уровень биологической продуктивности экосистемы определяется не только величиной общего запаса биогенных веществ, но, в первую очередь, скоростью их рециркуляции через сообщества гидробионтов. Поэтому изучение вопросов, касающихся круговорота биогенных элементов, необходимо как для разработки теории функционирования водных экосистем, так и для решения прикладных задач, связанных с прогнозом изменения трофического статуса водоемов и формирования качества воды в условиях антропогенного евтрофирования.

Цель работы. На примере озер Нарочанской группы рассмотреть роль биогенных элементов (углерода, азота и фосфора) в биотическом круговороте и евтрофировании водоемов разного трофического уровня, уделив особое внимание фосфору, как основному евтрофирующему элементу. В задачи исследований входило: в озерах Баторино, Мястро и Нарочь определить общий запас биогенных веществ и изучить факторы, его формирующие; количественно оценить основные потоки фосфора в процессе биотического круговорота; рассмотреть возможность применения к исследованным озерам известных эмпирических моделей связи режима фосфора с трофическим статусом водоемов; выяснить особенности режима биогенных веществ в оз.Нарочь, способствующие сохранению в нем высокого качества воды.

Фактический материал, научная новизна и практическая значимость. Работа выполнена на базе Нарочанской биологической станции Белгосуниверситета имени В.И.Ленина и представляет раздел комплексных исследований, проводимых на озерах сектором гидробиологии Проблемной НИИ экспериментальной биологии. В основу работы положены полевые наблюдения, выполненные автором в 1978-83 гг., а также опубликованные материалы лаборатории по биотическому балансу энергии экосистемы Нарочанских озер.

Впервые для озер Нарочанской группы на протяжении 5 лет проведены систематические наблюдения за сезонной динамикой содержания в воде соединений углерода, азота и фосфора. На осно-

- 3 -

ВНИРО
№: 1207
Института

вании собственных материалов по химическому составу ручьевых вод и атмосферных осадков и данных гидрометеослужбы по водному режиму озер дана оценка внешней биогенной нагрузки водоемов. Рассчитаны основные внутриводоемные потоки биогенных веществ и составлен баланс фосфора – главного евтрофирующего элемента для большинства водоемов. На основании данных по биотическому балансу энергии и химическому составу отдельных компонентов биоты, рассчитаны потоки фосфора в процессе биотического круговорота и оценена их роль в обеспечении наблюдаемого уровня первичной продукции. Рассмотрена возможность применения в прогностических целях широко применяемых в лимнологической практике моделей связи фосфорной нагрузки с концентрацией этого элемента в озерной воде и уровнем развития фитопланктона.

Полученные материалы позволили выявить как общие закономерности, так и некоторые особенности режима биогенных веществ в озерах разного трофического типа. Эти данные дают возможность более глубокого понимания механизма функционирования экосистемы Нарочанских озер, что приобретает особую актуальность в связи с проблемой антропогенного евтрофирования оз.Нарочь, на берегах которого формируется крупный курортно-рекреационный комплекс республики.

Материалы, представленные в данной работе, учтены при разработке Генеральной схемы комплексного использования и охраны водных и земельных ресурсов бассейна оз.Нарочь и использованы рядом организаций и ведомств для разработки природоохранных мероприятий, что подтверждено соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на конференциях молодых ученых Белгосуниверситета имени В.И.Ленина в 1979, 1981 и 1984 гг.; на Сессии Бел.отделения ВГБО, г.Минск, 1983; на VI Всесоюзном совещании "История озер в СССР", г.Таллин, 1983; на III Всесоюзном симпозиуме по антропогенному евтрофированию природных вод, г.Москва, 1983; на XXVII Всесоюзном гидрохимическом совещании, г.Ростов-на-Дону, 1984; на Пленуме ВГБО, г.Москва, 1986 и на V съезде ВГБО, г.Тольятти, 1986.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, 6 из которых в виде тезисов.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения,

четырёх глав, выводов и списка литературы (211 публикаций, в том числе 118 отечественных), иллюстрирована 50 таблицами и 27 рисунками и занимает 190 страниц машинописного текста.

Автор выражает глубокую благодарность руководителю работы к.б.н. Александру Павловичу Остапене, сотруднику Института озероведения АН СССР к.г.н. Е.А.Стравинской, а также Р.З.Ковалевской и всем сотрудникам сектора гидробиологии Проблемной НИИ экспериментальной биологии за внимание и помощь, оказанные на всех этапах выполнения работы.

Глава I. Объект и методы исследования

Нарочанская группа озер расположена на северо-западе Белоруссии в бассейне р.Неман. Озера находятся в одном регионе, подвержены практически одинаковым природным воздействиям и связаны между собой протоками, но, в силу морфометрических и гидрологических различий, находятся на разных стадиях евтрофирования: оз.Баторино – высокоевтрофный, оз.Мястро – евтрофный, оз.Нарочь – мезотрофный водоем. Общая характеристика исследованных водоемов, их биотическая структура и закономерности функционирования подробно описаны в литературе (Винберг, 1953; Винберг, Бабицкий, Гаврилов и др., 1971; Якушко, 1971; Экологическая система Нарочанских озер, 1985), а некоторые основные параметры представлены в таблице I.

Таблица I.

Основные морфометрические и гидрологические характеристики и средние для вегетационного сезона показатели качества воды в Нарочанских озерах

Показатели	оз.Нарочь			оз.Мястро			оз.Баторино		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Площадь водосбора, км ²		279,0		133,0			92,3		
Площадь водного зеркала, км ²		79,6		13,1			6,3		
Объем водной массы, млн.м ³		710,4		70,0			18,7		
Глубина средняя, м		9,0		5,4			3,0		
	максимальная, м		24,8		11,3		5,5		
Удельная водообменность, год		11,0		2,5			1,0		
Прозрачность, м		5,3		1,6			0,8		

	1	2	3	4
Концентрация сестона, мг·л ⁻¹		1,7	7,3	27,4
Валовая первичная продукция на оптимальной глубине, мгО·л ⁻¹ ·сут ⁻¹		0,2	1,5	2,7
Деструкция, мгО·л ⁻¹ ·сут ⁻¹		0,13	0,44	0,82
Концентрация хлорофилла "а", мкг·л ⁻¹		4,3	20,9	64,7
БКХ ₅ , мгО·л ⁻¹		1,0	2,2	3,8

Концентрацию биогенных элементов (С, N, P) определяли общепринятыми методами (Унифицированные методы анализа вод, 1973; Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши, 1977; Бикбулатов, Бикбулатова, Григорьева, 1978). Общее содержание органического углерода, азота и фосфора определяли в нефльтрованной воде. Во взвеси, собранной на фильтры "Zypro" (1,5 и 0,45 мкм) и "Whatman-GF", определяли зольность, содержание фосфора, азота и углерода, а в фильтрате - концентрацию растворенного органического углерода, фосфатного фосфора и минеральных форм азота (аммонийного, нитратного, нитритного).

Глава II. Режим биогенных элементов в озерах и факторы, его определяющие

Изучение роли биогенных веществ в функционировании водных экосистем невозможно без знания общей картины их режима. Согласно традиционным гидрохимическим представлениям, под режимом биогенных веществ понимается оценка их запаса и выявление факторов, определяющих данный запас, а также наблюдение за сезонной и межгодовой динамикой их концентрации. На фоне серьезной гидробиологической изученности Нарочанских озер, сведения о биогенных элементах в них до недавнего времени были немногочисленны. Это предопределило необходимость проведения специальных исследований, результаты которых представлены в данной главе.

II.1. Распределение биогенных элементов по акватории и в водной толще озер

Распределение биогенных элементов по акватории озер изучали во время съемок по сетке станций в марте 1978 г. и в августе 1983 г. В подледный период наблюдалась некоторая пространственная неоднородность химического состава воды. Средние величины

концентраций минеральных форм азота и фосфора и размах колебаний на литоральных станциях были выше, чем в пелагической части озер. Для оз. Нарочь, например, эти параметры для минерального азота составили $0,54 \pm 0,41$ ($n=21$) и $0,12 \pm 0,05$ ($n=33$) мг·л⁻¹. Средние значения концентрации органического углерода, напротив, оказались выше в пелагической части, особенно в районах больших глубин ($9,44 \pm 1,54$, $n=6$ и $10,62 \pm 0,78$, $n=8$ для оз. Баторино). В период открытой воды, за счет интенсивного ветрового перемешивания, распределение биогенных веществ по акватории озер более равномерно. Концентрация органического и минерального азота и общего фосфора в литоральной ($n=14$) и пелагической ($n=9$) зонах оз. Нарочь, например, была равна соответственно $0,48 \pm 0,13$ и $0,47 \pm 0,15$; $0,07 \pm 0,01$ и $0,07 \pm 0,01$; $0,056 \pm 0,041$ и $0,047 \pm 0,011$ мг·л⁻¹. Вертикальная неоднородность распределения биогенных веществ наблюдается в зимнее время и в непродолжительные периоды летней температурной стратификации.

II.2. Сезонная динамика содержания биогенных элементов в воде и взвешенном веществе озер

Принимая во внимание относительную однородность химического состава водной массы исследованных озер, наблюдения за сезонной динамикой содержания биогенных веществ проводили на 2-3-х постоянных станциях в интегральных пробах, отражающих средний состав озерной воды. Среднегодовые концентрации отдельных форм соединений углерода, азота и фосфора и их сезонная динамика представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2
Среднегодовые концентрации биогенных элементов в воде озер Нарочь, Мястро и Баторино по данным 1978-83 гг.

Биогенные элементы	оз. Нарочь				оз. Мястро				оз. Баторино			
	концентрации, мг·л ⁻¹				концентрации, мг·л ⁻¹				концентрации, мг·л ⁻¹			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Органический углерод:												
общий		$5,17 \pm 0,37$				$8,53 \pm 0,87$				$12,26 \pm 2,94$		
взвешенный		$0,45 \pm 0,18$				$1,30 \pm 0,62$				$3,11 \pm 2,24$		
Азот: общий		$0,85 \pm 0,20$				$1,15 \pm 0,17$				$1,70 \pm 0,29$		
взвешенный		$0,05 \pm 0,03$				$0,14 \pm 0,08$				$0,24 \pm 0,25$		

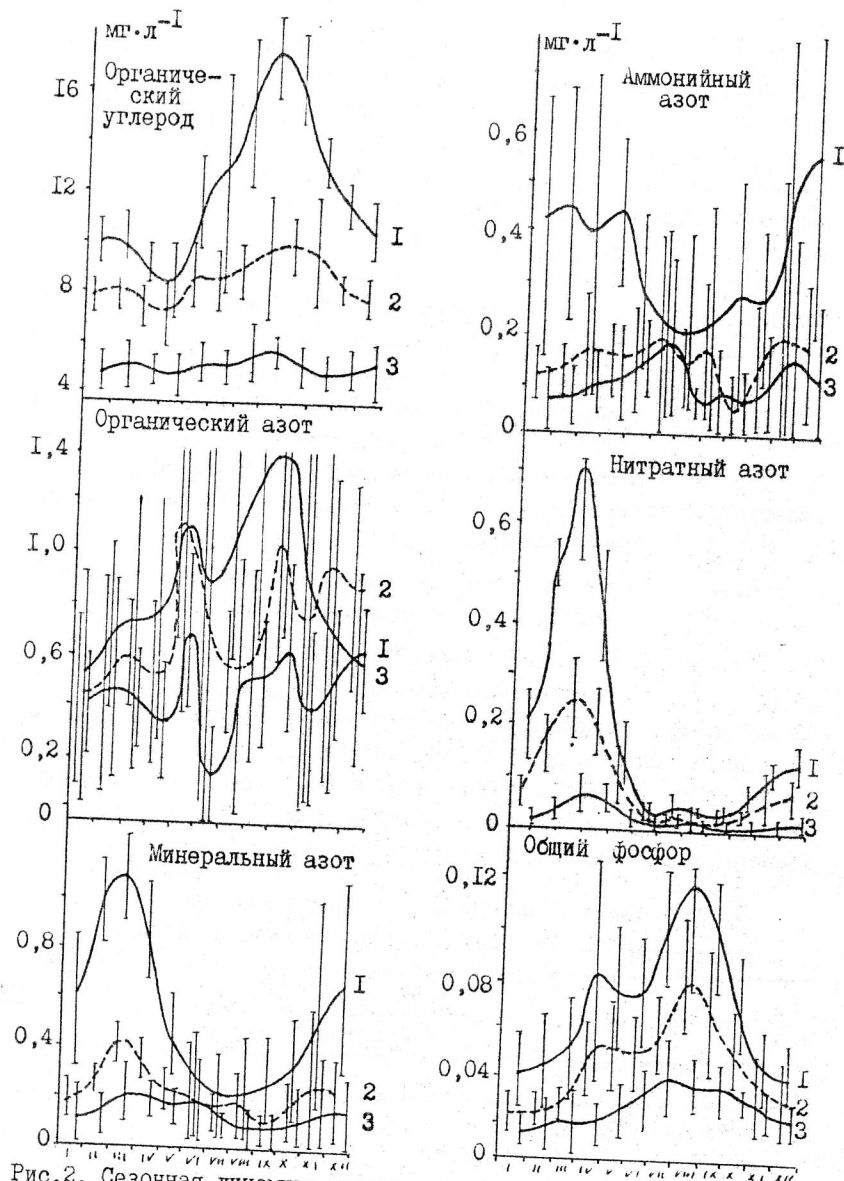


Рис. 2. Сезонная динамика содержания биогенных веществ в воде озер Баторино (I), Мясстро (2) и Нарочь (3) по данным 1978-83 гг.

	I	2	3	4
органический	0,67±0,16	0,94±0,24	1,09±0,29	
аммонийный	0,110±0,043	0,151±0,041	0,355±0,119	
нитратный	0,024±0,019	0,085±0,083	0,202±0,233	
нитритный	0,001±0,001	0,002±0,001	0,005±0,003	
Фосфор: общий	0,027±0,007	0,045±0,018	0,069±0,027	
взвешенный	0,007±0,004	0,022±0,016	0,051±0,030	
фосфатный	0,002±0,001	0,003±0,001	0,003±0,002	

Органический углерод в озерах Нарочь, Мясстро и Баторино представлен, в основном, растворенными формами. Содержание взвешенной его фракции в зимнее время составляет 8-9 % общего количества, возрастая летом в среднем соответственно до 9,2, 19,6 и 32,2 %. Зольность сестона в годовом цикле изменяется от 30 до 50 %.

Сезонная динамика содержания азота в воде озер четко выражена для отдельных его форм (органического, взвешенного, минерального) и менее четко - для общего запаса. В озерах Нарочь и Мясстро в течение зимы органический азот преобладает над минеральным, уменьшаясь за время подледного периода с 87 до 73 и с 75 до 64 % соответственно. В оз. Баторино в начале зимы наблюдается равное соотношение этих форм, тогда как в марте органический азот составляет не более 40 % от общего запаса соединений этого элемента. В сумме минеральных форм в воде оз. Нарочь преобладают ионы аммония (60-75 %) и лишь в конце подледного периода в отдельные годы соотношение аммонийного и нитратного азота становится близким к единице. В озерах Мясстро и Баторино доля нитратов в течение зимы увеличивается с 30 до 60 % от общего количества минеральных форм. Во время вегетационного периода во всех трех озерах преобладает аммонийный азот, а концентрация нитратов составляет 0,01-0,04 мг·л⁻¹, уменьшаясь иногда до следовых количеств. Содержание нитритов в годовом цикле минерального азота не превышает 1-2 % в сумме минеральных форм. Взвешенный азот составляет зимой 1,7-2,3 % от общего содержания этого элемента, возрастая летом до 24-31 %. Удельное содержание азота в сестоне колеблется от 1 до 7 % в расчете на сухое вещество. Среднее отношение C:N во взвешенном веществе озер Нарочь, Мясстро и Баторино равно соответствен-

нно 6,8, 5,9 и 7,1.

В общем запасе соединений фосфора в воде всех трех озер характерно преобладание органических форм над минеральными. Концентрация фосфатного фосфора редко превышает 10 мкг.л^{-1} и зачастую аналитически не определяется. Содержание взвешенных форм в зимнее время составляет 26–29 % от общего запаса фосфора в водной массе, возрастающей летом в среднем до 38, 69 и 91 % соответственно. Удельное содержание фосфора в сестоне озер в зимнее время составляет 0,6–0,8 %, снижаясь после вскрытия озер до 0,1–0,4 % и вновь возрастающей в течение вегетационного периода до 0,5–0,7 %. Среднегодовое отношение С:Р во взвешенном веществе озер Нарочь, Мястро и Баторино равно 54, 64, 85.

Как показали приведенные результаты, с возрастанием уровня трофии озер увеличиваются концентрации всех форм соединений углерода, азота и фосфора в воде озер, возрастает относительная доля взвешенных фракций в общем запасе соединений этих элементов (среднегодовое отношение растворенного и взвешенного органического углерода в озерах Нарочь, Мястро и Баторино равно 10,6, 5,6 и 2,9, азота – 13,7, 5,6 и 3,9, фосфора – 2,4, 1,1 и 0,5), меняется соотношение органических и минеральных форм азота (4,5, 3,8 и 1,9), аммонийного и нитратного азота (4,6, 1,8 и 1,8 соответственно). Различно и соотношение общих форм С:N:P в воде и взвешенном веществе озер. С возрастанием уровня трофии данное отношение в воде несколько уменьшается (N:P равно 32, 29 и 27), а во взвеси возрастает (C:N:P равно 54:8:1, 64:11:1 и 85:12:1). Исходя из данных по компонентному составу сестона Нарочанских озер (Остапеня, 1985) и литературных данных по химическому составу организмов планктона, это отношение рассчитано и для основного компонента сестона – детрита, где оно составило соответственно 58:8:1, 76:13:1 и 109:15:1. Соответствующее отношение в поверхностном 2-см слое донных отложений равно 94:15:1, 98:12:1 и 113:13:1.

11.3. Внешний баланс биогенных элементов и внешняя биогенная нагрузка озер

Запас биогенных веществ в водной массе озер формируется за счет их поступления с водосборной территории и внутриводоемных процессов обмена с донными отложениями.

– 10 –

Поступление биогенных элементов в озера оценено на основе данных гидрометеослужбы по водному режиму озер и средним концентрациям азота и фосфора в атмосферных осадках (снег – 1,65 и 0,028; дождь – 1,40 и 0,033 мг.л^{-1}) и поверхностном стоке (соответственно 2,61 и 0,082 мг.л^{-1}).

Данные по прямому смыву взяты из работы Н.Я.Хох и В.П. Романова (1981). Рекреационная нагрузка рассчитана согласно экспериментальным данным, приведенным в работе Л.Шульц (Schulz, 1981) (потенциальный привнос одним купающимся в день равен 3,1 г азота и 94 мг фосфора), из расчета, что купальный сезон длится около 3-х месяцев, а общая единовременная численность отдыхающих на побережье оз.Нарочь составляет 11500 человек.

Сток биогенных веществ из озер рассчитан по величинам годового водного стока и концентрациям азота и фосфора в озерной воде. Потери с выловом рыбы оценены по данным уловов Нарочанского рыбокомбината (оз.Нарочь 3,3–7,0, оз.Мястро 8,6–21,1, оз. Баторино 3,8–14,8 кг.га^{-1}) и среднему химическому составу рыб (Маккентун, 1977).

Внешний баланс биогенных элементов в исследованных озерах представлен в таблицах 3, 4.

Таблица 3

Внешний баланс биогенных элементов в оз.Нарочь

Статьи баланса	Водный баланс, млн.м ³	Азот, т.год ⁻¹				Фосфор, т.год ⁻¹			
		органический	минеральный	сумма	органический	минеральный	сумма	органический	минеральный
I	2	3	4	5	6	7	8		
Приход:									
атмосферные осадки	55,87	76,4	23,9	52,5	1,65	0,79	0,86		
сток из верхнего озера	23,56	23,1	16,7	6,4	0,87	0,79	0,08		
ручьевого стока	8,42	17,8	8,9	8,9	0,43	0,26	0,17		
прямой смыв	–	–	–	0,5	0,07	–	–		
рекреационная нагрузка	–	3,6	–	–	0,11	–	–		
		–	11	–					

	1	2	3	4	5	6	7	8
итого:		121,4				3,13		
Расход:								
водный сток		52,20	55,8	47,0	8,8	1,47	1,31	0,16
вылов рыбы		-	1,0	-	-	0,12	-	-
итого:			56,8			1,59		
Аккумуляция в озере			64,6			1,54		

Таблица 4
Внешний баланс биогенных элементов в озерах Мястро и Баторино

Статья баланса	оз. Мястро			оз. Баторино		
	водный баланс, млн.м ³	* азот т.год ⁻¹	фосфор т.год ⁻¹	водный баланс, млн.м ³	* азот т.год ⁻¹	фосфор т.год ⁻¹
Приход:						
атмосферные осадки	9,70	12,6	0,28	4,91	6,1	0,13
сток из верхнего озера	12,61	20,8	0,86	0	0	0
поверхностный сток	5,48	14,8	0,46	11,52	46,0	1,45
итого:		48,2	1,60		52,1	1,58
Расход:						
водный сток	23,56	23,1	0,87	12,61	20,8	0,86
вылов рыбы	-	0,6	0,07	-	0,2	0,02
итого:		23,7	0,94		21,0	0,88
Аккумуляция в озере		24,5	0,66		31,1	0,70

Примечание: * - данные гидрометеослужбы.

Внешняя биогенная нагрузка озер Нарочь, Мястро и Баторино по азоту составляет 1,52, 3,68 и 8,26, по фосфору - 0,039, 0,122 и 0,251 г.м⁻².год⁻¹. От 40 до 60 % поступивших биогенных веществ аккумулируется в озерах.

11.4. Внутренний баланс биогенных элементов и внутренняя биогенная нагрузка озер

Внутренний баланс биогенных элементов в озерах представлен следующими составляющими: аккумуляция биогенных элементов, поступивших с водосбора, седиментация в составе взвешенного вещества, поток из донных отложений в воду и накопление в донных

отложениях.

Величины аккумуляции (результатирующая внешнего баланса) оценены в предыдущем разделе и составляют для озер Нарочь, Мястро и Баторино соответственно по азоту 0,81, 1,87 и 4,93, по фосфору - 0,02, 0,05 и 0,11 г.м⁻².год⁻¹. Поток седиментации взвешенного вещества в исследованных озерах определен экспериментально (Остапеня, 1983) и, в расчете на углерод, составляет соответственно 22, 52 и 69 г.м⁻².год⁻¹. Исходя из среднего C:N:P отношения в седиментируемом материале (59:4:1, 64:4:1 и 86:6:1) рассчитаны годовые потоки седиментации азота (1,49, 3,25 и 4,81) и фосфора (0,37, 0,81 и 0,80 г.м⁻².год⁻¹).

Оценка потока фосфора из донных отложений в воду (внутренняя нагрузка) проведена методом балансового расчета. Если принять состояние озер близким к стационарному (среднегодовая концентрация фосфора за период наблюдений изменялась от 0,026 до 0,030 мг.л⁻¹), то, исходя из постоянства запаса фосфора в озере, внутренняя нагрузка численно равна разности между величинами седиментации и аккумуляции фосфора, поступившего с водосбора (соответственно 0,35, 0,76 и 0,69 г.м⁻².год⁻¹). Рассчитывать подобным образом нагрузку по азоту не представляется целесообразным, так как при этом не учитываются процессы азотфиксации и денитрификации.

Результативней внутреннего баланса является накопление биогенных элементов в донных отложениях, которое, исходя из балансового расчета, составляет по фосфору соответственно 0,04, 0,05 и 0,11 г.м⁻².год⁻¹.

Общий баланс фосфора в исследованных озерах представлен на рисунке 2.

Достоверность полученных результатов можно оценить следующим образом. Общий запас фосфора в водной массе озер формируется за счет его поступления с водосборной территории и из донных отложений за вычетом потерь с водным стоком, выловом рыбы и накоплением в донных отложениях. Из данных, приведенных на рис.2, получаем, что среднегодовой запас фосфора в воде оз. Нарочь равен 27,6 т, что близко к наблюдаемым величинам (19,4 ± 4,5 т, см.рис.2). Это позволяет сделать важный вывод о ведущей роли внутриводоемных процессов в формировании запаса фосфора в водной массе этого озера. Менее удовлетворительное совпадение

получено для озер Мястро и Баторино (9,9 и 4,3 т против 3,2±1,3 и 1,3±0,5 наблюдаемых).

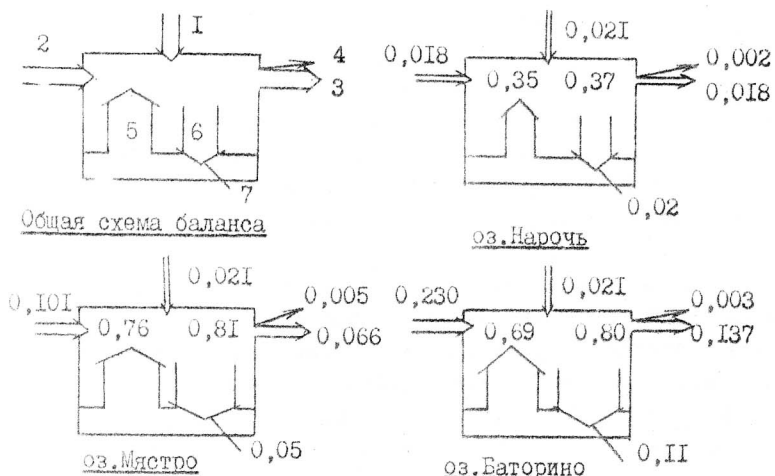


Рис. 2. Баланс фосфора в озерах Нарочанской группы (1—атмосферные осадки, 2—поверхностный сток, 3—водный сток, 4—вылов рыбы, 5—поток из донных отложений, 6—седиментация, 7—накопление в донных отложениях. Поток в г.м⁻².год⁻¹).

Глава III. Роль отдельных компонентов озёрной экосистемы в круговороте фосфора

В процессе функционирования водных экосистем запас биогенных элементов включается в биотический круговорот, в значительной степени определяя трофический уровень водоемов. Среднегодовое отношение N:P в исследованных озерах близко к 30, что позволяет считать фосфор первостепенным лимитирующим первичную продукцию элементом.

Многолетние гидробиологические исследования, проводимые на Нарочанских озерах, позволили составить биотический баланс энергии озёрной экосистемы (Винберг, 1985). На основании этих данных, с учетом среднего химического состава гидробионтов, рассчитаны основные потоки фосфора в ходе биотического круговорота.

Важнейшим потоком фосфора является ассимиляция его автотрофным звеном экосистемы в процессе новообразования органичес-

кого вещества (табл.5).

Таблица 5

Ассимиляция фосфора автотрофными организмами и оценка потоков фосфора, обеспечивающих первичную продукцию в Нарочанских озерах

Показатели	оз. Нарочь	оз. Мястро	оз. Баторино
Валовая первичная продукция за вегетационный сезон, ккал.м ⁻² ж:			
фитопланктон	729	2371	3198
перифитон	570	215	36
макрофиты	152	345	138
Ассимиляция фосфора автотрофными организмами, гР.м ⁻² .сезон ⁻¹ жж	3,42	6,91	8,52
Поступление фосфора с водосбора, гР.м ⁻² .год ⁻¹ жжж	0,02	0,05	0,11
% от ассимиляции	0,6	0,7	1,3
Поступление фосфора из донных отложений, гР.м ⁻² .год ⁻¹	0,35	0,76	0,69
% от ассимиляции	10,2	11,1	8,1
Экскреция фосфора зоопланктоном, гР.м ⁻² .сезон ⁻¹	1,22	1,57	2,99
% от ассимиляции	35,7	23,0	35,3

Примечание: ж — по: Винберг, 1985; жж — $1 \text{ ккал} = 0,1068 \text{ гС}$, весовое отношение С:Р в водорослях 41 (Бикбулатов, 1979), в макрофитах — 174 (данные анализа 10 видов Нарочанских макрофитов); жжж — с учетом потерь с водным стоком.

Из величин суммарной валовой первичной продукции и среднего химического состава водорослей и макрофитов рассчитали, что за вегетационный сезон в озерах Нарочь, Мястро и Баторино ассимилируется 3,42, 6,91 и 8,52 гР.м⁻². Приняв, что продукция за вегетационный сезон близка к суммарной годовой и разделив данный поток на среднегодовое содержание фосфора в воде, получаем скорость оборота запаса общего фосфора. Этот показатель, несмотря на условность (например то, что ассимилируется лишь биологически доступный фосфор), может характеризовать напряженность биотических процессов и, как следует из расчетов, возрастает с увеличением уровня трофии (соответственно 14,1, 28,2 и

40,9 год⁻¹).

Принципиальной является оценка основных источников фосфора, обеспечивающих наблюдаемый в озерах уровень первичной продукции. Суммарный годовой приток фосфора в водную массу озер с водосбора и из донных отложений составляет лишь около 10 % потребности автотрофных организмов в этом элементе. Это свидетельствует о высокой скорости рециркуляции фосфора в водоеме, связанной, главным образом, с жизнедеятельностью микрофлоры и водных животных.

Расчет потоков фосфора через сообщество бактериопланктона Нарочанских озер представлен в табл. 6.

Таблица 6
Потоки фосфора через сообщество бактериопланктона Нарочанских озер

Показатели	! оз. Нарочь ! оз. Млястро ! оз. Баторино		
Производство за вегетационный сезон, ккал.м ⁻² *	257	874	1108
Потребность в фосфоре, гР.м ⁻²	1,29	4,37	5,54
Дыхание, ккал.м ⁻²	385**	1186	1955
гС.м ⁻²	41,1	126,7	208,8
Минерализация фосфорсодержащего органического вещества:			
1) озерная вода, С:Р	222:1	235:1	202:1
гР.м ⁻² .сезон ⁻¹	0,19	0,54	1,03
% от потребности	14,4	12,3	18,7
2) лабильное органическое вещество, С:Р	30:1	30:1	30:1
гР.м ⁻² .сезон ⁻¹	1,37	4,22	6,96
% от потребности	106,2	96,6	125,6

Примечание: * - по: Винберг, 1985; ** - с учетом поправки, см. Винберг, 1985.

Потребность бактериопланктона в фосфоре принята эквивалентной величине продукции (с учетом, что 5 ккал = 1 г сух.в-ва) в расчете на содержание в ней фосфора (2,5 %). Поток минерализованного органического вещества рассчитан из величины дыхания (1 ккал = 0,1068 гС). Если принять, что бактерии минерализуют ор-

- 16 -

ганическое вещество озерной воды без какой-либо дифференциации, то, из соответствующих отношений С:Р, получаем, что при этом обеспечивается лишь 12-18 % собственных потребностей сообщества в этом элементе. Если же предположить, что микрофлора усваивает лишь легкоокисляемую фракцию органического вещества (С:Р=30), то количество минерализованного фосфора практически эквивалентно собственным потребностям сообщества. Приведенные величины следует, вероятно, считать пределами возможных колебаний данного потока. Так, по данным С.И.Кузнецова (1970), при бактериальном разложении органического вещества на один атом фосфора минерализуется от 100 до 300 атомов углерода. В нашем случае это отношение колеблется от 77 до 500-600. Следовательно, микроорганизмы не играют сколько-нибудь заметной роли в прямом обеспечении автотрофных организмов минеральным фосфором, что согласуется с данными литературы (Johannes, 1968; Ejsmont-Karabin, Bownik-Dylinska, Godlewska-Lipowa, 1983).

Для обеспечения первичной продукции важное значение имеет поток фосфора, экскретируемый водными животными (Путельмахер, 1977; Johannes, 1968; Ejsmont-Karabin, 1983; Ejsmont-Karabin, Bownik-Dylinska, Godlewska-Lipowa, 1983). В озерах Нарочанской группы экскреция минерального фосфора тремя основными группами зоопланктона в расчете на вегетационный сезон составила 1,22, 1,57 и 2,99 гР.м⁻² (табл. 7), что соответствует 23-36 % потребности автотрофных организмов (см. табл. 5). Принимая во внимание, что в работе не учтен фосфор, экскретируемый простейшими и организмами бентоса и нектона, можно утверждать, что именно экскретируемый животными минеральный фосфор и является основным источником для обеспечения первичной продукции в исследованных озерах.

Таблица 7
Экскреция минерального фосфора сообществом зоопланктона Нарочанских озер

Показатели	! оз. Нарочь ! оз. Млястро ! оз. Баторино			
	1	2	3	4
Rotatoria E _p = 0,0154w - 1,27e 0,096 T				
Численность, тыс. экз.м ⁻³ *	26,82	47,69	42,21	

- 17 -

	1	2	3	4
Биомасса, мг·м ⁻³ *	99,30	167,52	7,13	
Экскреция, мкгР·мг ⁻¹ ·час ⁻¹	0,23	0,24	11,38	
<i>Scladocera</i> $E_p = 0,519 w^{-0,230} e^{0,039 T}$				
Численность, тыс. экз. м ⁻³ *	6,76	19,24	108,10	
Биомасса, мг·м ⁻³ *	173,30	510,70	2067,30	
Экскреция, мкгР·мг ⁻¹ ·час ⁻¹	0,75	0,74	0,80	
<i>Sorocera</i> $E_p = 0,299 w^{-0,645} e^{0,039 T}$				
Численность, тыс. экз. м ⁻³ *	28,94	46,53	95,20	
Биомасса, мг·м ⁻³ *	296,70	437,50	1142,40	
Экскреция, мкгР·мг ⁻¹ ·час ⁻¹	0,53	0,56	0,48	

Примечание: * - материалы предоставлены сотрудником Белгосуниверситета Н.М.Крычковой. Принято, что сухая биомасса составляет 10 % от сырой. Расчет экскреции по: Elymont-Karabin, 1984 (E_p - скорость экскреции, мкгР·мг⁻¹·сух.в-ва·час⁻¹, w - масса, мкг, T - 14, 9°C - средняя для вегетационного сезона температура воды в Нарочанских озерах).

Глава IV. Биогенные элементы как один из факторов формирующих трофический статус исследованных водоемов

IV.1. Оценка пригодности для исследованных озер известных эмпирических моделей связи фосфорной нагрузки с трофическим статусом водоема

Для решения задач, связанных с прогнозом изменения качества воды, в настоящее время разработан ряд эмпирических регрессионных моделей связи фосфорной нагрузки с содержанием этого элемента в озерной воде и уровнем развития фитопланктона. Применимость и возможные ограничения этих моделей широко обсуждаются (Dillon, Rigler, 1974; Vollenweider, 1979; Mahamah, Bhagat, 1983; Lee, Jones, 1984; Zimmerman, 1984; Видберг, 1981; Шилькрот, 1981).

Приведенные расчеты показали, что Нарочанские озера не вхо. г в число водоемов, удовлетворительно описываемых моделями, где концентрация фосфора в воде определяется лишь внешней фосфорной нагрузкой (Vollenweider, 1979; Dillon, 1975; Bachmann, 1984). Это связано со значительным влиянием внутренней нагрузки в формировании запаса фосфора в изученных озерах. Более

приемлемым, на наш взгляд, является вариант, предложенный в работе П. Осборна (Osborne, 1980):

$$M = \frac{L_{\text{внеш.}}(I-R)}{z \cdot p} + \frac{L_{\text{внутр.}}(I-R)}{z \cdot p},$$

где: M - концентрация элемента в озерной воде, г·м⁻³; L - внешняя и внутренняя нагрузка фосфором, г·м⁻²·год⁻¹; z - средняя глубина, м; p - условный водообмен, год⁻¹; R - коэффициент удержания фосфора в озере.

Коэффициент удержания можно рассчитывать по элементам внешнего баланса фосфора (Dillon, Rigler, 1974), либо эмпирическим уравнением, предложенным Ларсеном и Мерсье (Larsen, Mercier, 1976):

$$R = 0,426 e^{-0,271 \varepsilon_B} + 0,574 e^{0,00949 \varepsilon_B}$$

где: ε_B - водная нагрузка (отношение объема годового притока к площади озера).

Расчетные концентрации общего фосфора практически совпали с реально наблюдаемыми в оз. Баторино (0,072 и 0,069±0,027 мг·л⁻¹) но в 2 раза превышали соответствующие величины в озерах Мястро (0,088 против 0,045±0,018 мг·л⁻¹) и Нарочь (0,058 против 0,027±0,007 мг·л⁻¹).

По аналогии с известными моделями (Dillon, Rigler, 1974a; Perras, Trew, 1983) рассчитаны зависимости летнего содержания хлорофилла "а" (мг·м⁻³) от концентрации общего фосфора в воде (мг·м⁻³) после весеннего перемешивания (Жукова, Ковалевская, 1983):

$$\lg \text{Хл. "а"} = 1,88 \lg P - 1,55 \quad (r = 0,97)$$

или, учитывая полимиктический тип водоемов, от среднелетней концентрации фосфора:

$$\lg \text{Хл. "а"} = 1,97 \lg P - 2,22 \quad (r = 0,88).$$

Следует подчеркнуть, что использование этих моделей возможно лишь для приближенных оценок изменения трофического статуса в условиях антропогенного евтрофирования водоемов.

IV.2. Особенности режима биогенных элементов в оз. Нарочь в связи с проблемой антропогенного евтрофирования

Многолетние исследования, обобщенные в коллективной монографии "Экологическая система Нарочанских озер" (1985), позволили сделать вывод о высоком качестве воды в оз. Нарочь и устой-

чивости экосистемы к евтрофированию на ранних стадиях развития этого процесса. В значительной мере это обусловлено особенностями режима биогенных элементов.

Морфологические и гидрологические параметры водоема и условия формирования биогенного стока на водосборной территории определяют сравнительно низкие величины внешней биогенной нагрузки (по азоту 1,52, по фосфору 0,04 г.м⁻².год⁻¹). В формировании запаса фосфора в водной массе озера ведущая роль принадлежит внутренней нагрузке, которая превышает внешнюю почти на порядок. Принимая во внимание высокую буферную емкость донных отложений по отношению к фосфатам (Kufel, 1976, 1977), можно предположить, что даже при возросшей в последнее время внешней нагрузке, запас фосфора в водной массе озера изменился незначительно. Возможно, что данное соотношение внешней и внутренней нагрузок является одним из механизмов устойчивости экосистемы оз.Нарочь к евтрофированию.

Для прогноза состояния экосистемы оз.Нарочь в условиях интенсивной рекреационной нагрузки, необходима оценка величины внешней биогенной нагрузки, при которой возможен переход экосистемы на более высокий трофический уровень. Эти вопросы частично обсуждаются в работе А.П.Остапени с соавторами (Остапеня, Павлютин, Жукова, 1985). Следует признать, что использованные там для расчетов модели не являются пригодными для исследованных озер, так как в них не учитывается внутренняя нагрузка. Поэтому сроки достижения критической концентрации фосфора в воде, при которой возможен переход оз.Нарочь на евтрофный уровень (7-9 лет), являются неоправданными.

Для более корректной оценки необходимо учитывать влияние не только внешних, но и внутриводоемных процессов на формирование запаса фосфора в водной массе озера. Кроме того, следует иметь в виду, что уровень биологической продуктивности определяется не только величиной общего запаса фосфора в водоеме, но и скоростью его рециркуляции в процессе биотического круговорота.

Выводы

1. Уровень биологической продуктивности исследованных озер определяется интенсивностью потоков биогенных элементов через сообщества гидробионтов. Среднегодовое отношение N:P близкое к 30, позволяет считать фосфор основным элементом, лимитирующим

первичную продукцию в экосистеме Нарочанских озер.

2. Режим биогенных элементов в исследованных озерах в общих чертах типичен для водоемов умеренной зоны. Каждое из озер характеризуется определенным запасом биогенных элементов в воде, подверженном, за счет variability гидрометеорологических условий, сезонным и межгодовым колебаниям. По данным 1978-83 гг. среднегодовые концентрации органического углерода в воде озер Нарочь, Мястро и Баторино составили 5,17, 8,53 и 12,26 мг.л⁻¹, общего азота - 0,85, 1,15 и 1,70 мг.л⁻¹, общего фосфора - 0,027, 0,045 и 0,069 мг.л⁻¹.

3. Запас биогенных веществ в воде озер формируется за счет поступления их с водосборной территории (внешняя нагрузка) и из донных отложений (внутренняя нагрузка) за вычетом потерь с водным стоком и накопления в донных отложениях. Внешняя биогенная нагрузка озер Нарочь, Мястро и Баторино составляет по азоту 1,52, 3,68 и 8,26, по фосфору 0,04, 0,12 и 0,25 г.м⁻².год⁻¹. От 40 до 60 % внешнего поступления аккумулируется в озерах. Внутренняя фосфорная нагрузка составляет 0,35, 0,76 и 0,69 г.м⁻².год⁻¹, а накопление фосфора в донных отложениях - соответственно 0,02, 0,05 и 0,11 г.м⁻².год⁻¹.

4. В оз.Нарочь основным внешним источником поступления биогенных веществ являются атмосферные осадки (50-60 % общего поступления). Сток из вышележащих озер составляет 20-30 %, а поверхностный сток с водосбора - около 20 %. В оз.Мястро соответствующие статьи баланса в среднем равны 25, 50 и 30 %, а в оз. Баторино до 90 % биогенных веществ поступает с поверхностным стоком.

5. Величины седиментации азот- и фосфорсодержащего взвешенного вещества в озерах Нарочь, Мястро и Баторино равны 4,1, 8,9 и 13,2 (для азота) и 1,01, 2,22 и 2,19 (для фосфора) мг.м⁻².сутки⁻¹, что составляет 1-2 % от среднегодового содержания взвешенных форм соединений этих элементов в водной массе озер. В донных отложениях накапливается от 5 до 14 % фосфора, поступившего сюда в процессе седиментации. Содержание азота и фосфора в поверхностном слое донных отложений озер составляет 0,9-5,7 и 0,09-0,39 % в расчете на сухое вещество.

6. Уровень трофии озер определяет характер трансформации соединений биогенных элементов. С возрастанием трофического

статуса увеличивается доля взвешенных форм в общем запасе биогенных веществ в озерной воде, изменяется соотношение органических и минеральных форм соединений азота. Отношение C:N:P в воде уменьшается, а во взвешенном веществе и донных отложениях — возрастает.

7. С повышением уровня трофии возрастают величины потоков фосфора в процессе биотического круговорота и скорость оборота запаса общего фосфора за счет ассимиляции его автотрофными организмами.

8. Уровень первичной продукции в исследованных озерах определяется не только величиной запаса общего фосфора в воде, но и скоростью его рециркуляции в процессе биотического круговорота. Основным источником фосфора в обеспечении первичной продукции является его экскреция водными животными. Так, поток минерального фосфора, экскретируемого тремя основными группами зоопланктона обеспечивает 23–36 % потребности первичных продуцентов в этом элементе.

9. Количество минерального фосфора, образующееся при минерализации органического вещества бактериопланктоном исследованных озер, эквивалентно собственным потребностям сообщества при отношении C:P в субстрате порядка 30:1. При меньшем соотношении бактериопланктон может обеспечивать автотрофные организмы биологически доступным фосфором, при большем — является их конкурентом, потребляя из окружающей среды минеральный фосфор.

10. Применение в прогностических целях широко используемых в лимнологической практике эмпирических регрессионных моделей связи режима биогенных элементов с трофическим статусом водоема для исследованных озер возможно при учете некоторых ограничений. В частности, необходимо учитывать влияние не только внешней, но и внутренней биогенной нагрузки и принимать во внимание полимиктический тип озер.

11. Высокое качество воды в оз. Нарочь и устойчивость экосистемы к антропогенному евтрофированию в значительной степени обусловлены особенностями режима биогенных элементов. В первую очередь сюда относятся сравнительно низкие величины внешней биогенной нагрузки и определяющая роль внутриводоемных процессов в формировании запаса фосфора в водной массе озера. Соотношение внешней и внутренней фосфорных нагрузок является одним

из основных механизмов гомеостаза экосистемы оз. Нарочь.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Емельянов Ю.Н., Остапеня А.П., Жукова Т.В., Карабанович В.С. Роль атмосферных осадков в поступлении биогенных элементов в экосистему оз. Нарочь. — В сб.: Влияние хозяйственной деятельности на природу Белоруссии. Минск, изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1981, с. 21–27.

2. Жукова Т.В. Содержание фосфора в воде озер разного типа трофии. — Тез. докл. V лимнол. совещ. "Круговорот вещества и энергии в водоемах". Листвничное на Байкале. Вып. V. Гидрохимия и донные отложения. Иркутск, 1981, с. 51.

3. Жукова Т.В. Особенности режима биогенных элементов в озерах Нарочь, Мясстро, Баторино. — Тез. докл. науч. конф. молодых ученых "Актуальные проблемы общественных и естественных наук", Минск, Высшая школа, 1981, с. 137–138.

4. Жукова Т.В. Биологически доступный фосфор в водной экосистеме. — В сб.: Итоги и перспективы гидробиологических исследований в Белоруссии. Мат. Сессии Бел. отд. ВГБО, Мн., 1983, с. 89–92.

5. Жукова Т.В. Динамика фосфора в донных отложениях и ее связь с процессами седиментации. — Тез. докл. VI Всес. совещ. "История озер в СССР", Таллин, 1983, т. I, с. 80.

6. Жукова Т.В., Ковалевская Р.З. Связь фосфор-хлорофилл "а" в озерах разной трофии. — Тез. докл. III Всес. симпозиум по антропогенному евтрофированию природных вод. Москва, сентябрь, 1983, Черногловка, 1983, с. 202–204.

7. Жукова Т.В. Евтрофирование водоемов на примере оз. Нарочь. — Тез. докл. конф. мол. ученых "Актуальные проблемы охраны, рационального использования и воспроизводства природ. ресурсов", Мн., 1985, с. 116.

8. Жукова Т.В., Остапеня А.П. Режим биогенных элементов. — В кн. Экологическая система Нарочанских озер. Минск, изд-во Университетское, 1985, с. 22–29.

9. Жукова Т.В. Химический состав взвешенного вещества озер Нарочанской группы. — В сб. Биол. ресурсы водоемов в условиях антропогенного воздействия. Киев, 1985, с. 102–103.

10. Остапеня А.П., Павлютина Л.П., Жукова Т.В. Условия и факторы, определяющие качество вод и трофию озер. — В кн. Экол. система Нарочанских озер. Минск, изд-во Университетское, 1985, с. 263–269.