

Н.В. Игнатьева

ОЦЕНКА ПОТОКОВ ФОСФОРА В ПОГРАНИЧНОЙ ЗОНЕ ОСАДОК — ВОДА В ПСКОВСКО-ЧУДСКОМ ОЗЕРЕ

N. V. Ignatyeva

ESTIMATION OF PHOSPHORUS FLUXES IN THE SEDIMENT — WATER BOUNDARY ZONE IN LAKE PEIPSI

Оценены основные потоки фосфора в пограничной зоне осадок — вода в разных частях Псковско-Чудского озера: седиментация, захоронение в толще осадка, поступление из донных отложений в воду. Ориентировочная величина внутренней фосфорной нагрузки на озеро соизмерима с внешней нагрузкой и составляет 43–45 % суммарного годового поступления фосфора в озеро.

Ключевые слова: фосфор, эвтрофирование, обмен осадок — вода, внутренняя фосфорная нагрузка.

Main phosphorus fluxes across the sediment — water interface: sedimentation, burial within the sediment and release to the overlying water, have been estimated in different areas of Lake Peipsi. Estimated tentative value of internal phosphorus load is commensurable with the value of external phosphorus load, and is equal to 43–45 % of total annual phosphorus input into the lake.

Key words: phosphorus, eutrophication, sediment — water exchange, internal phosphorus load.

Введение

Одним из главнейших факторов, определяющих уровень первичного продуцирования в озерах, является обеспеченность озерных экосистем фосфором. Важную роль в формировании фосфорного запаса в водной массе играют процессы, происходящие в пограничной зоне осадок — вода и верхнем слое донных отложений. Здесь непрерывно осуществляется накопление, трансформация и транспорт фосфорсодержащих соединений в противоположных направлениях как внутри осадка, так и через границу раздела осадок — вода. Наиболее интенсивно процессы раннего диагенеза протекают в верхнем слое осадка, поэтому еще с 30-х гг. прошлого столетия донные отложения стали делить на верхний, примерно 10-см «активный слой», принимающий участие во всем озерном метаболизме, и более глубокий «исторический слой».

Основными потоками фосфора в пограничной зоне осадок — вода являются потоки седиментации на поверхность дна (S), захоронения в толще осадка (B) и поступления из донных отложений в водную массу (J). В низкопродуктивных водоемах донные отложения выступают в основном в качестве накопителя фосфора, таким образом осадконакопление является одним из факторов самоочищения водной массы. По мере развития процесса эвтрофирования интенсивность материального обмена на

границе раздела осадок — вода возрастает, при этом меньшая доля биогенных веществ накапливается в осадках, тогда как существенно возрастает вторичное их поступление из донных отложений в водную толщу, создающее внутреннюю биогенную нагрузку (I) на водоем.

К числу крупных пресноводных озер, в значительной степени подверженных антропогенному эвтрофированию, относится Псковско-Чудское озеро — четвертый по площади водного зеркала (3555 км²) мелководный водоем Европы и крупнейший трансграничный водоем (с 1992 г.), расположенный на границе между Россией и Эстонией. Этот озерный комплекс состоит из трех отчетливо различающихся между собой частей: большого Чудского, меньшего Псковского озер и соединяющего их пролива, именуемого Теплым озером. Процесс антропогенного эвтрофирования Псковско-Чудского озера начался в 50-х гг. прошлого века, но стал очевидным только в 90-х [7]. В 1991–1994 гг. озеро относилось к эвтрофному типу, преимущественно слабозагрязненному с отдельными более сильно загрязненными участками. На данном этапе существования Псковское озеро классифицируется как гиперэвтрофное, Теплое озеро — переходящее к гиперэвтрофному, Чудское — эвтрофное озеро [8].

Основным фактором, стимулирующим развитие фитопланктона в озере и его эвтрофирование, является интенсивное поступление фосфора с водосборной территории. В настоящее время внешняя фосфорная нагрузка (L) на озеро составляет около 830–900 т год⁻¹, при этом соотношение между значениями нагрузки с российской и эстонской частей водосбора соответствует соотношению их площадей [3]. Что касается внутренней нагрузки, то она до сих пор не была оценена. Известна лишь единичная оценка потока фосфора со дна, составляющая около 0,2 г Р м⁻²год⁻¹, которая сделана эстонскими исследователями на основе анализа колонки глинистых донных отложений, отобранных в центральной части Чудского озера на эстонской территории [6].

Основная цель работы заключалась в оценке потоков фосфора в пограничной зоне осадок — вода и роли донных отложений в круговороте фосфора в Псковско-Чудском озере на современном этапе его существования.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены материалы, собранные летом 2008 г. на мониторинговых станциях Псковского отделения ГосНИОРХ, расположенных на российской части Псковско-Чудского озера, а также в летне-осенний период 2013 г. на глинистых осадках центральной части Чудского озера. Донные отложения (колонки мощностью 10–15 см) отбирались дночерпателем Экмана-Берджа, придонная вода — батометром Limnos. В целом, отбор проб производился на 10 станциях: 5 станций в Чудском озере, 5 — в Псковском озере, одна из которых (ст. 21) находится в дельте р. Великой — основного притока озера (рис. 1а). Большая часть станций (за исключением ст. 13 и 39) расположена в зоне залегания тонкодисперсных осадков (рис. 1б).

Фосфор твердой фазы донных отложений анализировался по методу Мета в модификации М.В. Мартыновой и Н.А. Шмидеберг [5].

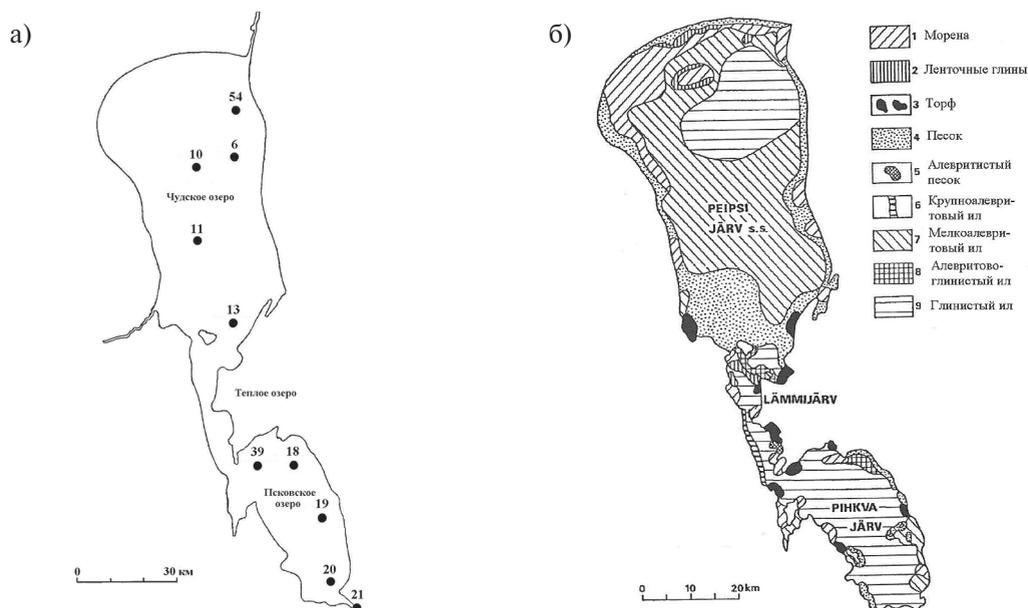


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб (а) и распространение структурных типов донных отложений Псковско-Чудского озера (б)

На основе данных о содержании общего фосфора (ТР) в поверхностном слое отложений и скоростях осадконакопления [6] были рассчитаны потоки седиментации фосфора на дно озера. Для расчета захоронения фосфора использованы данные о содержании ТР в осадке на глубине 10–15 см от поверхности. Оценка потоков фосфора из донных отложений в воду и внутренней фосфорной нагрузки выполнена по методу, разработанному в ИНОЗ РАН [1, 2]. Данный метод дает оценку суммарного потока фосфора со дна, формирующегося в результате действия различных механизмов в течение определенного промежутка времени, например, года. В глубоководных районах крупных водоемов формирование внутренней нагрузки происходит в стационарных (квазистационарных) условиях, при которых абсолютные значения и соотношение потоков вещества в пограничной зоне осадок — вода остаются практически постоянными в течение годового цикла. Поскольку в мелководных полимиктических водоемах, каким является Псковско-Чудское озеро, абсолютные значения и соотношение потоков вещества подвержены сезонным изменениям, т.е. условия стационарности не соблюдаются, данную оценку внутренней фосфорной нагрузки следует рассматривать как ориентировочную.

Фосфор твердой фазы донных отложений. Результаты выполненного анализа проб осадков показывают, что в целом, для Псковского озера, как водоема более высокого трофического статуса, характерно более высокое содержание общего фосфора в поверхностном слое (наилке) донных отложений (в среднем в полтора раза), чем для Чудского озера (соответственно, 0,278–1,788 и 0,717–1,408 мг Р г⁻¹) (расчет сделан на

воздушно-сухую навеску — в.с.н.). Независимо от гранулометрической характеристики, фосфор содержится в твердой фазе донных отложений озера в основном в форме неорганических соединений (IP). Доля органического фосфора (OP) составляет 20–41 % TP в Чудском озере и 24–30 % в Псковском озере.

Прослеживается закономерная тенденция увеличения содержания фосфора в осадках с глубиной в озере и от грубодисперсных к тонкодисперсным осадкам. Это объясняется как транспортом оседающего на дно материала в более глубоководную зону, так и неспособностью песчаных и опесчаненных отложений удерживать фосфат-ионы.

Исследование вертикального распределения фосфора в колонках донных отложений показало, что в Псковском озере наблюдается более резкое, чем в Чудском озере, снижение содержания общего и неорганического фосфора на глубине 10–15 см в осадке по сравнению с поверхностным слоем (наилком). В качестве примера на рис. 2 представлен вид вертикальных концентрационных профилей форм фосфора в иловых отложениях на ст. 10 и 19, соответственно, в Чудском и Псковском озерах.

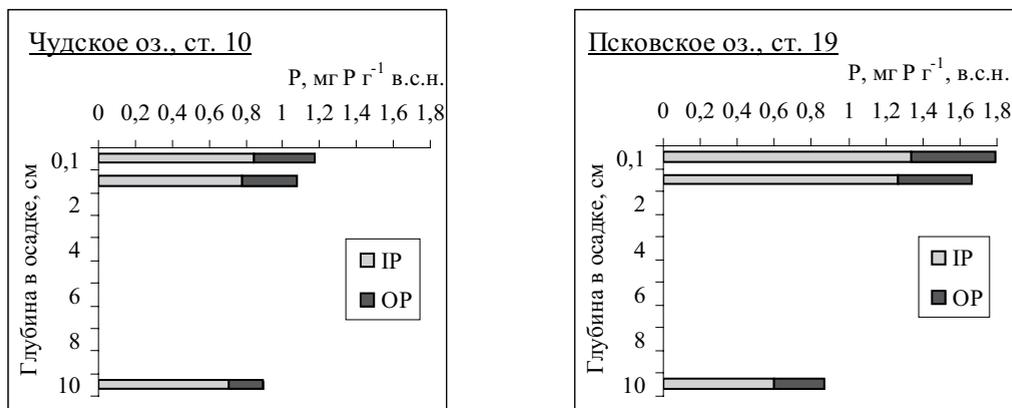


Рис. 2. Вертикальный профиль распределения форм фосфора в твердой фазе тонкодисперсных донных отложений на ст. 10 (Чудское озеро) и ст. 19 (Псковское озеро)

Фосфор порового раствора. От 70 до 80 % объема алевритов и до 92–95 % объема илов Псковско-Чудского озера занимает поровое пространство, заполненное поровым раствором — наиболее мобильной фракцией донных отложений, в которой осуществляется диффузионный транспорт фосфора, главным образом, в форме фосфат-ионов. Концентрации неорганического фосфора в поровом растворе осадков Чудского озера изменялись в основном в диапазоне 0,012–0,040 мг P л⁻¹, Псковского озера — 0,036–0,082 мг P л⁻¹, т.е. были в 2–3 раза выше, что также вполне закономерно, поскольку по мере развития процесса эвтрофирования происходит обогащение порового раствора биогенными элементами. Концентрации фосфатов в поровом растворе подвержены значительным сезонным изменениям. Так, в течение летне-осеннего периода концентрации в поровых растворах иловых отложений Чудского озера изменялись в 2–2,5 раза.

Седиментация и захоронение фосфора в донных отложениях. В табл. 1 представлены значения потоков седиментации и захоронения фосфора в донных отложениях на станциях отбора проб. Меньше всего фосфора оседает в районах залегания алевритовых отложениях (ст. 13 и 39) и на ст. 54, расположенной вблизи от восточного побережья Чудского озера.

Таблица 1

Потоки седиментации (*S*), захоронения (*B*) и поступления фосфора из донных отложений в воду (*J*) Псковско-Чудского озера ($\text{мг Р м}^{-2}\text{сут}^{-1}$) и соотношение основных потоков на станциях отбора проб

Район озера	Чудское озеро						Псковское озеро			
	ил				алеврит		ил			
Номер станции	54	6	10	11	13	39	18	19	20	21
<i>S</i>	1,09	1,52	1,69	3,01	0,96	1,28	2,01	2,30	2,17	3,10
<i>B</i>	0,99	1,09	1,28	1,79	0,85	0,54	1,01	1,11	0,90	1,36
<i>B/S</i> , %	90	72	78	60	89	42	50	48	41	44
<i>J</i>	0,11	0,43	0,41	1,21	0,11	0,74	1,01	1,19	1,27	1,75
<i>J/S</i> , %	10	28	24	40	11	58	50	52	59	56

Наибольшие величины потоков седиментации относятся к иловым отложениям ст. 11 (Чудское озеро) и к ст. 1, расположенной в дельте р. Великая. В целом, плотность потоков седиментации в Псковском озере выше, чем в Чудском озере. Наибольшие величины потоков относятся к зонам залегания тонкодисперсных осадков. Плотность потоков захоронения фосфора в тонкодисперсных отложениях примерно одинакова, независимо от района озерной системы.

С учетом пространственного распределения типов осадка подсчитано, что в течение года на дно Псковско-Чудского озера оседает 1890 т фосфора, из них 1275 т в Чудском озере и 615 т в Псковском и Теплом озере (табл. 2). Около 73 % осевшего на дно Чудского озера фосфора захоранивается в осадке, соответствующая доля фосфора в Псковском озере в полтора раза ниже — 47 % (средние значения для станций отбора проб), т.е. удерживающая способность осадков по отношению к фосфору (*B/S*) снижается с повышением трофического статуса водоема. В среднем, во всей озерной системе захоранивается 65 % седиментировавшего фосфора.

Таблица 2

Седиментация и захоронение фосфора в донных отложениях Псковско-Чудского озера

Район озера	Седиментация		Захоронение		<i>B/S</i> , %
	$\text{г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$	т год^{-1}	$\text{г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$	т год^{-1}	
Чудское озеро	0,582	1275	0,410	936	73
Псковское и Теплое озеро	0,750	615	0,327	288	47
Все озеро	0,628	1890	0,387	1224	65

Поступление фосфора из донных отложений в воду. Бóльшая величина убыли фосфора с глубиной в колонках осадков Псковского озера свидетельствует о более интенсивном его поступлении из осадков в водную массу по сравнению с Чудским озером. Рассчитанные величины потоков фосфора из донных отложений составляют 0,738–1,748 мг Р м⁻²сут⁻¹ для Псковского озера и 0,106–1,214 мг Р м⁻²сут⁻¹ для Чудского озера (табл. 1, рис. 3). Наименьший поток относится к илистым отложениям ст. 54 (Чудское озеро), наибольший к ст. 21, расположенной в дельте р. Великая. Обобщение литературных данных, сделанное М.В. Мартыновой [4], показывает, что в среднем для пресноводных водоемов мезо-эвтрофного типа величина выделения фосфора со дна составляет десятые доли миллиграмма с квадратного метра в сутки, не превышая 1 мг Р м⁻²сут⁻¹. С повышением продуктивности водоема величина потока со дна существенно возрастает. По мере удаления от устья р. Великая в северном направлении поступление фосфора из донных отложений Псковского озера имеет тенденцию к снижению (рис. 3).

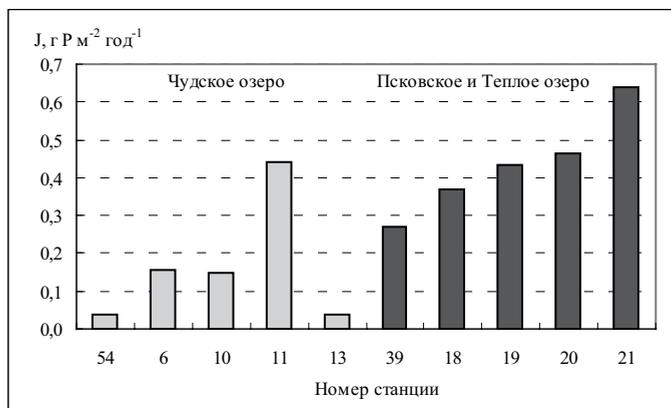


Рис. 3. Распределение потоков фосфора из донных отложений озера вдоль условного продольного разреза с севера на юг

В табл. 3 представлены величины годовых потоков фосфора из различных типов донных отложений и со всей площади дна озера. Как можно заметить, из тонкодисперсных осадков (глинистых, алевритово-глинистых и мелкоалевритовых илов) Чудского озера в воду поступает в 5 раз больше фосфора, чем из других типов озерных осадков (песков, алевритистых песков, крупноалевритовых илов) — соответственно, 0,197 и 0,039 г Р м⁻²год⁻¹. Полученная величина (0,197 г Р м⁻²год⁻¹) хорошо согласуется с расчетом потока фосфора из илистых осадков центральной части Чудского озера, приведенным в работе Пуннинга и Капанен (2009). Поток фосфора из илистых отложений Псковского озера (0,419 г Р м⁻²год⁻¹) в 2 раза больше соответствующего потока со дна Чудского озера и в полтора раза больше потока из других типов отложений (0,269 г Р м⁻²год⁻¹) Псковского озера. В среднем, плотность потока фосфора из донных отложений Псковского озера втрое выше, чем Чудского озера (соответственно, 0,460 и

0,155 г Р м⁻²год⁻¹). С учетом пространственного распределения типов донных отложений рассчитано, что ежегодно из донных отложений в водную массу Псковско-Чудского озера поступает 667 т фосфора, причем примерно равное количество из отложений Чудского озера (339 т) и Псковского и Теплового озер (328 т). В расчет не включены площади дна озера, занятые мореной, ленточными глинами и торфом, на которых не происходит озерного осадконакопления. Величина внутренней фосфорной нагрузки на данном этапе существования озера составляет 74–80 % от внешней нагрузки.

Таблица 3

Поступление фосфора из донных отложений Псковско-Чудского озера

Тип донных отложений	Площадь, км ²	J	
		г Р м ⁻² год ⁻¹	т год ⁻¹
Чудское озеро			
Тонкодисперсные отложения	1605	0,197	316
Другие типы озерных донных отложений	586	0,039	23
Вся площадь озерных донных отложений	2191	0,155	339
Псковское и Теплое озеро			
Тонкодисперсные отложения	712	0,419	299
Другие типы озерных донных отложений	108	0,269	29
Вся площадь озерных донных отложений	820	0,460	328
Псковско-Чудское озеро			
Вся площадь озерных донных отложений	3011	0,221	667

Диффузия фосфат-ионов из толщи донных отложений является одним из механизмов их поступления в водную массу и вносит вклад в формирование суммарного потока (J). Оценка величины этой составляющей потока, сделанная на основе данных натуральных наблюдений в соответствии с первым законом диффузии Фика, показала, что диффузионные потоки составляют в Псковском озере 0,008–0,053 мг Р м⁻²сут⁻¹, в Чудском озере — 0,000–0,154 мг Р м⁻²сут⁻¹, что не превышает 4 и 13 % суммарных потоков фосфора, соответственно, в Псковском и Чудском озерах. Очевидно, основными транспортными механизмами поступления фосфора со дна Псковско-Чудского озера являются конвективный перенос, диффузия непосредственно с поверхности осадка и конвективно-диффузионный механизм, действующий в период осеннего охлаждения. Следует отметить, что величина диффузионных потоков в значительной степени подвержена сезонным изменениям.

Выводы

Анализ результатов работы показывает, что содержание и соотношение форм фосфора в донных отложениях Псковско-Чудского озера определяются главным образом типом осадка и биологической продуктивностью водоема в районе залегания

осадка. С ростом степени дисперсности донных отложений содержание всех форм фосфора в них увеличивается. Для Псковского озера, как более высокопродуктивного водоема, характерно более высокое содержание общего и неорганического фосфора в поверхностном слое донных отложений (в среднем в полтора раза) по сравнению с Чудским озером.

На современном этапе донные отложения Псковско-Чудского озера играют значимую роль в функционировании экосистемы в качестве источника вторичного поступления фосфора в водную массу. Рассчитанная величина внутренней фосфорной нагрузки на озеро соизмерима с внешней нагрузкой и составляет 43–45 % суммарного годового поступления фосфора в озеро. Плотность потока фосфора из донных отложений Псковского и Теплого озер в 3 раза превосходит соответствующую величину для Чудского озера.

Полученную величину внутренней фосфорной нагрузки ($0,221 \text{ г Р м}^{-2}\text{год}^{-1}$ или 667 т год^{-1}) следует считать ориентировочной. Вероятнее всего, реальная величина выше полученного при данном методе оценки значения, поскольку метод недоучитывает оборачиваемость фосфора и конвективный перенос при ветровом и антропогенном перемешивании. Более точную величину внутренней фосфорной нагрузки можно получить на основе данных натуральных наблюдений, выполняемых периодически (например, ежемесячно) в течение годового цикла.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 12-05-00702-а.

Литература

1. *Игнатьева Н.В.* Фосфор в донных отложениях и фосфорный обмен на границе раздела вода-дно в Ладожском озере. // Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Институт озероведения РАН. — СПб., 1997. — 24 с.
2. *Игнатьева Н.В.* Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме. // В кн.: Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. — СПб.: Наука, 2002, с. 148–157.
3. *Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С.* Моделирование абиотических процессов в системе водосбор-водоем (на примере Чудско-Псковского озера). — СПб.: РАН, 2010. — 102 с.
4. *Мартынова М.В.* Закономерности процессов накопления, трансформации и выделения со дна водоемов соединений азота и фосфора. // Автореф. дисс. докт. геогр. наук. — Ростов-на-Дону, 1988. — 47 с.
5. *Мартынова М.В., Шмидеберг Н.А.* О методах определения различных форм фосфора в донных наносах. // Гидрохимические материалы, 1983, т. 85, с. 49–55.
6. *Šumberova B.* Transboundary Water Management on the Future Border of the European Union — Lake Peipsi. — Электронный журнал. — Budapest, 2003.
7. *Sialnacke P., Vasiliev A., Skakalsky B. et al.* Nutrient loads to Lake Peipsi (Environmental monitoring of Lake Peipsi/Chudskoe 1998–99). — Электронный журнал. — Jordforsk Report, N 4/01, 2001.
8. *Punning J.-M., Karanen G.* Phosphorus flux in Lake Peipsi sensu stricto, Eastern Europe. // Estonian Journal of Ecology, 2009, 58 (1), pp. 3–17.