

ФОСФОР В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

(Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 14-17-00766)

Изучено современное распределение фосфора в донных отложениях Онежского озера. Показано, что динамика изменения его содержания за период наблюдений 1975–2012 гг. соответствует характеру изменения внешней фосфорной нагрузки и определяется процессами эвтрофирования водоема. Проведена оценка внутренней фосфорной нагрузки в зависимости от типа грунта и степени антропогенного воздействия. Изучение геохимических особенностей накопления фосфора в донных осадках показало, что основным механизмом удержания фосфора в донных отложениях Онежского озера являются сорбционные процессы на гидроксидах железа в области редокс-барьера.

Ключевые слова: Онежское озеро, донные отложения, внутренняя фосфорная нагрузка.

N. Belkina

PHOSPHORUS IN THE SEDIMENTS OF THE LAKE ONEGA

The current distribution of phosphorus in the sediments of the Lake Onega is studied. It is shown that the dynamics of the changes in its contents during the observation period 1975–2012 corresponds to the nature of the changes in the external phosphorus load and eutrophication processes of the reservoir. The estimation of the internal phosphorus load depending on the sediment type and the extent of human influence has been done. The study of geochemical features of the accumulation of phosphorus in the sediments showed that the main mechanism of retention of phosphorus in the sediments of the Lake Onega is the sorption processes on iron hydroxides in the redox barrier.

Keywords: the Lake Onega, sediments, internal phosphorus load.

Онежское озеро — второй по величине пресноводный водоемом Европы, ухудшение качества воды в котором может привести к проблемам с обеспечением питьевой водой всего Северо-Западного региона Российской Федерации. Оно входит в водосборный бассейн реки Невы, являющейся безальтернативным источником водоснабжения Санкт-Петербурга. Этот мегаполис во многом определяет качество воды Финского залива и всего Балтийского моря. Онежское озеро является объектом комплексного использования: служит источником питьевого, коммунально-бытового, промышленного водоснабжения и приемником сточных вод, является водохранилищем Верхне-Свирской ГЭС и водно-транспортной магистралью, имеет большое рыбохозяйственное и бытовое значение. Результаты антропогенного воздействия на экосистему большого геоморфометрически сложного водоема проявляются не сразу и неравномерно по всей акватории. Оценка состояния экосистемы Онежского озера в условиях многофакторного воздействия является сложной задачей, включающей в себя целый комплекс исследований, одним из направлений которого является изучение донных отложений. Накопление вещества в донных отложениях составляет основную черту озера как географического объекта и отражает процессы,

протекающие и в водоеме и на его водосборе. Накопления фосфора в донных отложениях вследствие его лимитирующей роли в водной экосистеме является одним из критериев оценки состояния экосистемы.

Целью данной работы является изучение особенностей накопления фосфора в донных отложениях Онежского озера и оценка внутренней фосфорной нагрузки. Фосфор поступает на дно в составе коллоидных гидрооксосоединений железа и терригенных минеральных частиц. Растворенный в воде неорганический фосфор вовлекается в трофические цепи в результате его потребления водорослями и бактериями. Короткий жизненный цикл фитопланктона определяет непрерывное поступление этого элемента в составе детрита в донные отложения во время вегетационного периода. Трансформация фосфора в донных осадках является сложным процессом, характер которого зависит от условий окружающей среды. В результате биологической утилизации органического вещества различными бентическими сообществами, которая сопровождается физическими и химическими процессами, подвижные формы фосфора поступают обратно в воду. Конвекционными потоками фосфор возвращается к поверхности водоема и снова связывается в «живое» вещество [7; 13; 15].

Суммарный поток биологически доступных соединений фосфора, поступающий в воду из донных отложений, в состав которого входят не только растворенные фосфаты и растворенные органические соединения фосфора, но и взвешенный фосфор, называется «внутренней фосфорной нагрузкой» [12]. Интенсивность и характер этого потока во многом определяются природой источников поступления фосфора в озеро, физико-химическими факторами среды, активностью биологических процессов и скоростью осадконакопления. Любое изменение гидро- и литодинамических, физико-химических и биогеохимических условий, связанное как с естественными факторами, так и с антропогенным воздействием, приводит к нарушению квазиравновесного состояния границы вода-дно и изменению характеристик потока веществ [1–3; 5; 8; 11–13; 15–17].

Онежское озеро — уникальный, холодноводный, второй по величине водоем Европы. Площадь зеркала составляет 9720 км², объем — 295 км³, средняя глубина — 30 м, наибольшая — 120 м, период условного водообмена — 15.6 лет. Неоднородность геологического строения котловины, располагающейся в зоне сочленения древнего Балтийского кристаллического щита и Русской платформы, определяет две резко различные морфоструктурные зоны — северную и южную — выделяющиеся в строении побережья и дна озера. Четвертичные отложения представлены озерно-ледниковыми ленточными глинами, озерными алевритами и илами голоцена. Площадное распределение различных типов донных отложений по дну котловины носит пестрый характер. Пески расположены по береговой линии, наибольшее распространение они имеют в центральной и южной частях озера. Обширная глубоководная область центральных районов озера и северо-западных заливов (49% от площади дна озера) покрыта тонкими глинистыми илами. На отдельных участках имеются выходы глин [10]. В Кондопожской и Петрозаводской губах встречаются донные отложения техногенного происхождения.

Воды озера отличаются малой минерализацией (39–46 мг/л). Средняя концентрация биогенных элементов в зависимости от района изменяется для Р_{общ.} от 10 до 32 мкг/л, N_{общ.} — 0.53–0.73, Si — 0.3–0.7 мг/л. Содержание кислорода близко к 100%-ному насыщению. Качество вод озера высокое, озеро малопродуктивное, олиготрофное. Крупные заливы (Кондопожская и Петрозаводская губы), подверженные процессам антропогенного евтрофирования, имеют мезотрофный статус. Основным поставщиком взвешенных веществ в Онеж-

ское озеро являются реки, со стоком которых в озеро ежегодно поступает около 60 000 т вещества. На протяжении 30 лет наблюдений внешняя фосфорная нагрузка на озеро изменялась в результате уменьшения хозяйственной деятельности на водосборе. Так, поступление фосфора с речным стоком в восьмидесятые годы прошлого века оценивалось в 500 т/год, в начале 90-х годов оно достигло своего максимума ~ 700 т/г, а в 2000-е снизилось до 440 т/год. Со сточными водами крупных промышленных центров в водоем в 90-е годы поступало в среднем 200 т/г, в 2000-е ~ 170 т/год [9].

В представленной работе проанализированы данные химического состава поверхностного слоя донных отложений за 40-летний период наблюдений (1964–2013 гг.). Содержание фосфора в донных отложениях определялось спектрофотометрически (РД 52,24,387-2006), валовый — после кислотного вскрытия воздушно-сухого грунта методом Кьельдаля, минеральный фосфор — после экстракции воздушно-сухого (до 1990 г.) и грунта естественной влажности (после 1990 г.) в растворе 1 N H₂SO₄ соответственно. Изучение фракционного состава неорганического фосфора проводилось с использованием схемы Хартикайнен [14] — метода последовательной экстракции осадка растворами: 1) 1 M NH₄Cl — лабильный фосфор (P_{лаб.} сорбирован на твердой фазе осадка и так пространственно ориентирован, что легко переходит в поровый раствор); 2) 0.5 M NH₄F — алюминийсвязанный фосфор (P_{Al}); 3) 0.1 M NaOH — железосвязанный фосфор (P_{Fe}); 4) 0.25 M H₂SO₄ — кальцийсвязанный фосфор (P_{Ca}). Содержание органического фосфора (P_{орг.}) вычисляли по разности между содержанием общего и суммарного фосфора неорганических фракций. Оценка поступления фосфора из донных отложений в водную массу озера проводилась балансовым методом (как разность между седиментацией и захоронением фосфора с учетом темпов осадконакопления) [5]. Диффузионные потоки рассчитывались по закону Фика или на основе концентрационного профиля растворенного фосфора в поровом растворе и надилловой воде.

В донные отложения Онежского озера фосфор, как правило, поступает с пелитовой фракцией, в результате чего его распределение по дну озера определяется динамикой вод. В целом для водоема сохраняется тенденция увеличения содержания фосфора с ростом глубины водоема и степени дисперсности осадка (табл. 1, рис. 1). В настоящее время содержание общего фосфора в поверхностном слое донных отложений изменяется от 0 до 1.7%, среднее значение — 0.21%, медианное — 0.19%. Сравнение современного распределения фосфора (рис. 1) в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений с материалами исследований прежних лет (табл. 1) свидетельствует о существенном изменении состава донных отложений, испытывающих антропогенное воздействие, и о значительном увеличении площади дна, подверженной эвтрофированию и загрязнению [1–4]. Особенно это проявилось в Петрозаводской, Кондопожской губах и в Повенецком заливе, где в районах, подверженных влиянию промышленных и бытовых сточных вод, нарушается естественная закономерность пространственного распределения элемента. Так, ранее на примере Кондопожской губы нами было показано, что изменчивость химического состава донных отложений, испытывающих влияние сточных вод ЦБК, связана с их качественным составом и с объемами сброса. До 1980 г. загрязнение донных отложений здесь носило локальный характер. Введение в эксплуатацию биологической очистки и рассеивающего выпуска сточных вод в 1983 г. привело к увеличению зоны антропогенного влияния и к изменению процессов седиментогенеза во всем заливе. Содержание фосфора в донных отложениях вершинной части губы на глубинах 7–14 м сравнимо с его содержанием в центре залива на глубине более 80 м [3].

Таблица 1

**Содержание фосфора в донных отложениях Онежского озера в 1964–1985 гг.
(слой 0–5 см, %, 1964–1985 гг.)**

Тип отложений	Центральное, Большое и Южное Онего		Петрозаводская губа		Кондопожская губа	
	<i>P</i> _{общ.}	<i>P</i> _{мин.}	<i>P</i> _{общ.}	<i>P</i> _{мин.}	<i>P</i> _{общ.}	<i>P</i> _{мин.}
Песок	0.03*	0.003	0.05	0.004	0.07	0.011
	0.02–0.07	0.001–0.005	0.01–0.10	0.002–0.007	0.04–0.09	0.008–0.019
Песок с илом	0.04	0.005	0.09	0.006	0.08	0.015
	0.01–0.06	0.001–0.030	0.02–0.12	0.003–0.008	0.03–0.09	0.009–0.018
Крупноалевритовый ил	0.08	0.010	0.07	0.009	0.09	0.017
	0.03–0.15	0.006–0.04	0.03–0.11	0.005–0.034	0.06–0.10	0.013–0.019
Мелкоалевритовый ил	0.10	0.049	0.10	0.015	0.09	0.030
	0.09–0.14	0.045–0.080	0.04–0.15	0.008–0.022	0.06–0.11	0.019–0.042
Глинистый ил	0.13	0.055	0.15	0.017	0.10	0.035
	0.10–0.20	0.05–0.110	0.07–0.18	0.008–0.025	0.06–0.18	0.015–0.052

Примечание: * числитель — среднее значение, знаменатель — пределы колебаний.

В результате увеличения фосфорной нагрузки на водоем в 80-е годы прошлого века содержание элемента в поверхностном слое илов аккумуляционных зон озера к 2005 году увеличилось в 2–3 раза (рис. 2, табл. 1). Рост концентрации фосфора происходил неравномерно. Обращают на себя внимание локальные максимумы, а затем минимумы его содержания в начале 90-х годов, что возможно соответствует росту, а затем резкому снижению внешней фосфорной нагрузки в этот период. Также интересен максимум концентрации фосфора в 2000-х и последовавшее за ним снижение концентрации, наблюдаемое во всех исследуемых районах озера. Как правило, резкое повышение содержания фосфора в донных отложениях аккумуляционных зон происходит через 3–5 лет после максимума биологических показателей. Так, в Петрозаводской губе максимумы биомассы фитопланктона (2.8 г/м³) и бентоса (13.4 г/м²) наблюдались в 90-е годы, а в центральном районе озера (0.8 г/м³ и 3.51 г/м²) — в 2001–2004 гг. [6]. Максимумы содержания фосфора в донных отложениях для этих районов приходятся на 2004 (0.3%) и 2009 годы (0.4%), соответственно. Характер изменения концентрации указывает на сложность процесса накопления фосфора в донных отложениях и неравномерное поступление элемента обратно в воду, зависящее и от внешних факторов (фосфорная нагрузка на водоем, продукционные процессы и движение элемента по трофическим цепям, седиментационный режим водоема и т. д.), и от внутренних (диагенез, включающий в себя физические, химические и биологические процессы преобразования осадка). Поступивший на дно с органическим веществом фосфор проходит сложную цепь биохимических преобразований бентическими сообществами и, выделяясь в виде фосфатов, накапливается в поверхностном слое в результате сорбции на гидроксо соединениях железа. Дальнейшее миграционное поведение элемента зависит от окислительно-восстановительного цикла железа, при восстановлении которого происходит высвобождение фосфора.

Арифметическое сглаживание данных о содержании элемента в поверхностном слое донных отложений (рис. 2) показывает, что динамика изменения концентрации фосфора соответствует характеру изменения количественных характеристик фитопланктона и мак-

розообентоса и определяется процессами евтрофирования Онежского озера. Время отклика донных отложений аккумуляционных зон, интегрирующих процесс евтрофирования экосистемы, запущенный в 80-е годы и проявившийся в накоплении фосфора в осадках, для разных районов озера различно (центральный район озера отреагировал на 5 лет позже, чем Петрозаводская губа). Процесс уменьшения концентрации фосфора в осадках, наблюдаемый нами в последние 5 лет и сопровождающийся снижением показателей зообентоса, подтверждает выводы биологов о том, что основным направлением сукцессии экосистемы Онежского озера в настоящее время является ее стабилизация после периода интенсивной евтрофикации в начале девяностых годов [6].

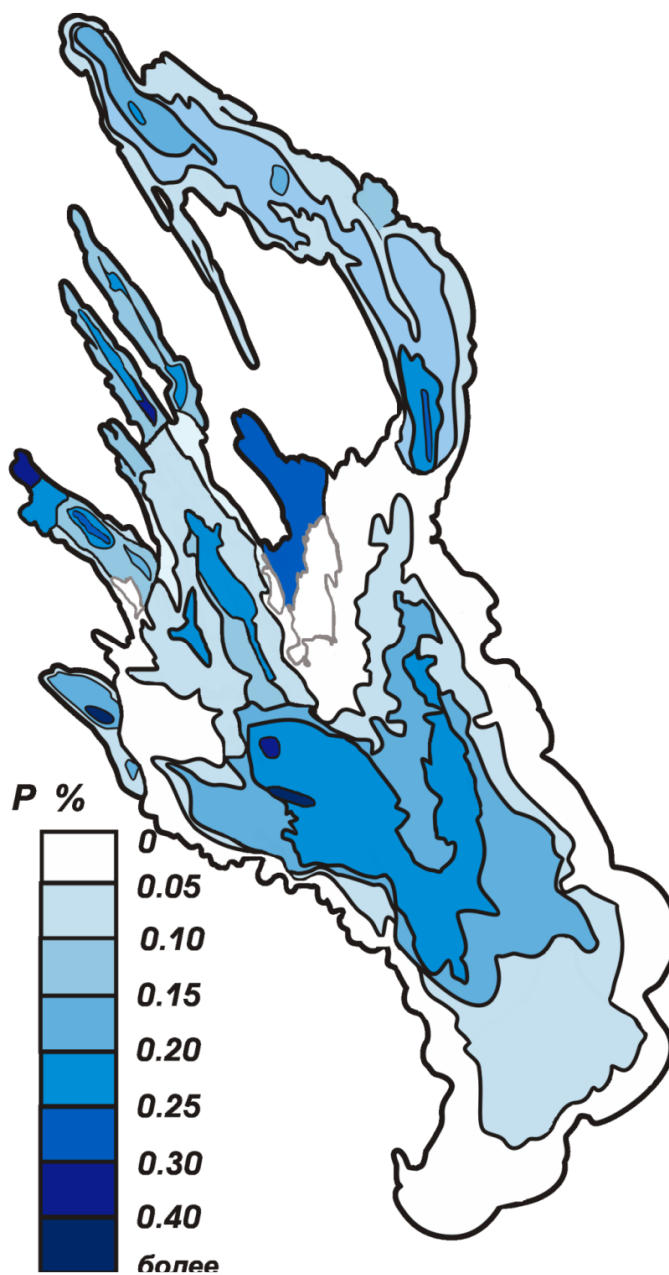


Рис. 1. Распределение фосфора в поверхностном (0–5 см) слое донных отложений Онежского озера

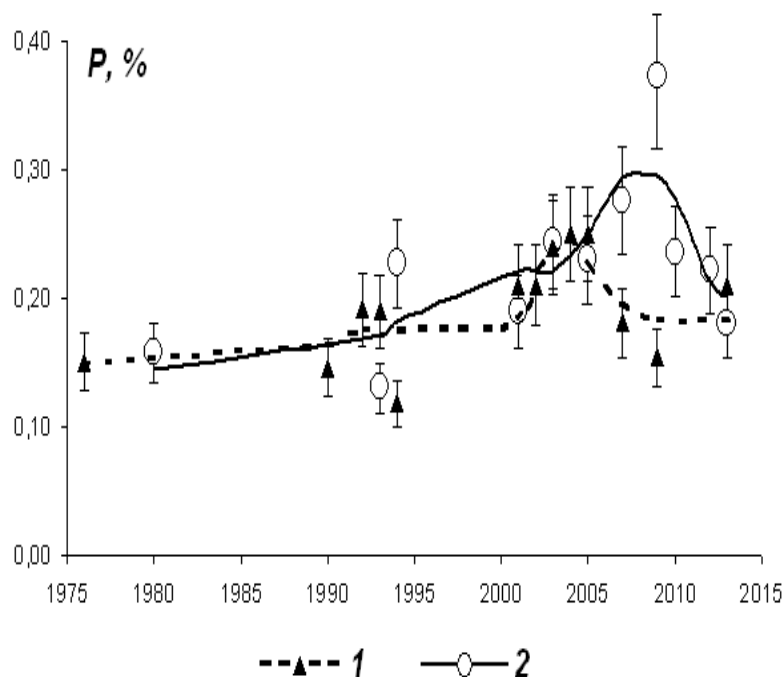


Рис. 2. Динамика содержания фосфора в донных отложениях зон аккумуляции:
 1 — в Петрозаводской губе (h = 28 м), 2 — в центральном районе (h = 58 м)

Содержание фосфора в составе взвешенного вещества, оседающего на дне водоема, невелико и колеблется от 0.16 до 1% (табл. 2). Сравнительный анализ содержания фосфора во взвешенном веществе вод придонного горизонта и его накопления в донных отложениях показал, что для Центрального и Большого Онего седиментация фосфора превышает его удаление из донных отложений, причем возвращается в водную толщу не более 5% и процесс минерализации проходит на поверхности донных отложений в тонком слое взвеси над осадком.

В поверхностном слое осадка (0–5 см) открытых районов озера, по-видимому, доминирует процесс сорбции фосфора на гидроксидах железа. Расчеты для песков Южного Онего показывают, что около 75% оседающего фосфора возвращается в воду. Но, в отличие от иловых осадков, определяющим фактором создания внутренней нагрузки в зоне залегания песков является динамика вод. В результате движения воды происходит неоднократное взмучивание, перенос и переотложение взвешенного материала. Для илов Петрозаводской и Кондопожской губ, испытывающих влияние сточных вод, с поверхности донных отложений в водную толщу возвращается до 60% оседающего фосфора. По мере удаления от источника загрязнения доля возврата фосфора уменьшается. Так, для центрального района Кондопожской губы в среднем она составляет 30% (из них 10% приходится на процессы трансформации, проходящие непосредственно на поверхности донных отложений, а 20% — на «живой» слой осадка).

Оценка поступления фосфора из донных отложений Онежского озера, проведенная балансовым методом, показала, что внутренняя фосфорная нагрузка по сравнению с данными начала века [1–4] снизилась в два раза и составила около 80 т в год. Интенсивность потока зависит от степени антропогенного влияния и типа грунта (табл. 3). Величина выделения фосфора из донных отложений Онежского озера изменяется от

0.001 до 3 мг Р · м⁻² · сут.⁻¹ Наименьшие потоки относятся к песчаным отложениям открытой части озера, наибольшие — к антропогенным осадкам Кондопожской губы. Средняя для всего озера величина составляет 0.1 мг Р · м⁻² · сут.⁻¹, что на порядок выше, чем среднее значение для оз. Байкал — 0.01 мг Р · м⁻² · сут.⁻¹, и ниже, чем для Ладожского озера — 0.13 мг Р · м⁻² · сут.⁻¹ и для оз. Онтарио — 0.19 мг Р · м⁻² · сут.⁻¹.

Таблица 2

Пределы колебаний (числитель) и средние значения (знаменатель) содержания фосфора во взвесах вод придонного горизонта и поверхностном слое иловых донных отложений (%), 2003–2010 гг.

Район	Вода	Донные отложения		
	1 м от дна	0-0.3 см	0-1 см	0-5 см
Центральный район	<u>0.13-0.28</u> 0.21	<u>0.19-0.21</u> 0.20	<u>0.15-0.35</u> 0.22	<u>0.18-0.60</u> 0.27
Большое Онего	<u>0.01-0.23</u> 0.20	*	<u>0.19-0.23</u> 0.20	<u>0.14-0.35</u> 0.24
Южное Онего**	<u>0.10-0.33</u> 0.17	*	*	<u>0.03-0.07</u> 0.04
Петрозаводская губа	<u>0.22-1.3</u> 0.56	<u>0.12-0.25</u> 0.21	<u>0.18-0.25</u> 0.22	<u>0.11-0.71</u> 0.21
Кондопожская губа (вершина)	<u>0.37-0.82</u> 0.58	*	<u>0.19-0.44</u> 0.29	<u>0.09-0.32</u> 0.16
Кондопожская губа (центр)	<u>0.23-0.47</u> 0.33	<u>0.30-0.31</u> 0.30	<u>0.13-0.29</u> 0.24	<u>0.20-0.33</u> 0.27

Примечание: * — данные отсутствуют; ** в районе Южного Онего залегают песчаные отложения.

Таблица 3

Зависимость поступления фосфора из донных отложений в воду от типа грунта для Онежского озера, средние величины, 2009–2010 гг. (мг · м⁻² · сут⁻¹)

Тип донных отложений	Глубина залегания, м	Md, мм	Открытая часть (Южное, Большое, Малое, Центральное Онего)	Кондопожская губа	Петрозаводская губа	Повецкий залив
Пески	0–25	> 0.1	0.001	*	0.01	0.001
Крупноалевритовый ил	5–20	от 0.05 до 0.1	*	*	*	0.02
Алевритовый ил	15–40	от 0.01 до 0.05	0.03	*	0.20	0.10
Алеврито-пелитовый ил	30–60	от 0.005 до 0.01	0.02	0.30	0.30	0.10
Пелитовый ил	50–100	< 0.005	0.01	0.01	*	*
Антропогенные осадки	0–35	от 0.001 до 0.1	*	1,30	0,90	*

Примечание: * — данные отсутствуют.

Разная интенсивность потока элемента из донных отложений определяется не только его количеством, но и качественным составом фосфора донных осадков. Формы накопления фосфора в донных отложениях изучались в Кондопожской губе, на четырех станциях, расположенных на расстоянии 1, 9, 15 и 24 км от целлюлозно-бумажного комбината «АО Кондопога» (табл. 4). Содержание фосфора в илах глубоководной зоны губы в среднем в два раза выше его концентраций в северной части и на выходе в Большое Онего. Характерным для донных отложений залива является высокий процент органического фосфора. Отношение С:Р изменяется в широких пределах (от 28 до 335), максимальные значения свойственны осадкам, расположенным в районе сброса сточных вод ЦБК. Из неорганических форм доминирует Fe — связанный фосфор. Обнаружено, что содержание фракции органического фосфора по глубине колонки донных отложений уменьшается, а доля фракции P_{Fe} увеличивается. На удалении 9 км от ЦБК, где процесс формирования донных отложений имеет ярко выраженный сезонный характер и колонка имеет светлые летние и черные зимние слои, содержание общего фосфора в поверхностном слое (0–1 см) выше, чем в толще осадка, и доля P_{Fe} — наибольшая (табл. 4). При дефиците кислорода в придонных водах столь значительное накопление этой фракции фосфора потенциально может привести к залповому поступлению фосфат-ионов в водную толщу. Интенсивное накопление фосфора на окислительно-восстановительном барьере в железосвязанной форме рассматривается автором как показатель антропогенного эвтрофирования Кондопожской губы вследствие сброса со сточными водами ЦБК значительного количества фосфора [3].

Таблица 4

**Значения Eh, фракционный состав фосфора (процент от $P_{общ.}$)
в поверхностном (0–5 см) слое осадков донных отложений
Кондопожской губы Онежского озера**

Расстояние от ЦБК, км	H, м	Eh, мВ	$P_{лаб.}$	P_{Al}	P_{Fe}	P_{Ca}	$P_{орг.}$
0.5	14	–30	0.4	14.2	15.7	8.8	61.0
9	32	+100	0.3	10.2	34.0	9.0	46.5
15	80	+150	0.2	1.9	30.8	15.3	51.9
26	35	+300	0.2	1.5	27.8	9.9	60.6

Оценка поступления фосфора из донных отложений показала, что поток изменяется от $1.3 \text{ мг Р} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут.}^{-1}$ в районе выпуска сточных вод до $0.1 \text{ мг Р} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут.}^{-1}$ на выходе из залива в открытое озеро (табл. 5). Столь разные значения потоков фосфора при близких общих содержаниях элемента в донных отложениях обусловлены не только фракционным составом донных отложений, но и окислительно-восстановительным состоянием донных отложений. Так, по физико-химическим характеристикам донные отложения вершинной части губы отличаются восстановительными условиями (зафиксированы низкие значения $pH = 5.2$ и $Eh = -30$ мВ). По мере удаления от ЦБК на поверхности донных отложений появляется окисленный слой, мощность которого постепенно увеличивается, растет значение окислительно-восстановительного потенциала от –30 до 300 мВ (табл. 4).

**Поступление фосфора J ($\text{мгР} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{сут.}^{-1}$) из донных отложений
и соотношение потоков захоронения (J_B) и седиментации (J_S)**

Район	Глубина, м	J	J_B/J_S
Зона антропогенного воздействия			
В районе ЦБК	10	1.3	65
В 9 км от ЦБК	32	0.5	88
Центральный район залива			
В 15 км от ЦБК	80	0.2	88
Динамическая зона			
В 26 км от ЦБК	35	0.1	68
Открытая часть Онежского озера			
Большое Онего	100	0.01	99

Онежское озеро является холодноводным водоемом с окислительным режимом вод. Наличие кислорода в поверхностном слое донных отложений определяет присутствие в иловых водах минеральных форм фосфора в высшей степени окисления. Поступление растворенных фосфатов из донных отложений в воду регулируются, как правило, двумя процессами: диффузией в результате возникновения концентрационного градиента и сорбцией на твердой фазе осадка. Различие в факторах осадконакопления (состав осадочного материала, темпы его поступления, гидродинамический режим и др.) разных станций Кондопожской губы обуславливает отличия концентрационных профилей иловых вод (рис. 3). Для донных отложений, сформированных отходами ЦБК, характерным является то, что растворенный фосфор, поступающий в воду, на 90% представлен органическим фосфором, который является продуктом анаэробного разложения органического вещества осадка. Концентрационный градиент, а следовательно, и весь поток минеральных форм фосфора, формируется во всей толще колонки донных отложений. В донных отложениях, залегающих на удалении 4 км от ЦБК, мощность слоя осадка, участвующего в создании диффузионного потока фосфора из донных отложений, не превышает 3 см, но концентрационный градиент на границе вода — дно (1000 мкг/см) на порядок больше, чем таковой в районе выпуска сточных вод (100 мкг/см), причем доля минерального фосфора в диффузионном потоке составляет 70%. Часть фосфатов, образующихся в результате минерализации органического вещества, сорбируется и накапливается в слое 2–3 см в зоне окислительно-восстановительного барьера, что соответствует локальному максимуму содержания фосфора и железа в твердой фазе донных отложений этой станции.

Необходимо отметить, что основная роль в создании потока фосфора из донных отложений в этом случае принадлежит слою биотурбации. Так, в результате деятельности бентосных организмов общее содержание фосфора уменьшается вдвое (от 0.3% на поверхности до 0.15% в слое 3–4 см). Устойчивый градиент растворенных форм фосфора иловых вод (100 мкг/см) ниже редокс-барьера указывает на возможный вклад анаэробных процессов разложения органического вещества в суммарный поток фосфора. Для концентрационных профилей растворенного фосфора иловых вод донных отложений глубоководного района (глубина — 80 м, рис. 3.в) и на выходе из губы (глубина залегания — 35 м, рис. 3.г) характерно его накопление в восстановительной зоне осадка ниже редокс-барьера, где идет формирование рудного прослоя, который, по-видимому, является механическим препятствием для диффузии растворенных форм в воду. Концентрационные градиенты, фор-

мирующие поток элемента в воду, различаются в три раза (450 мкг/см и 150 мкг/см соответственно), вклад минеральных форм в общий поток составляет 30%.

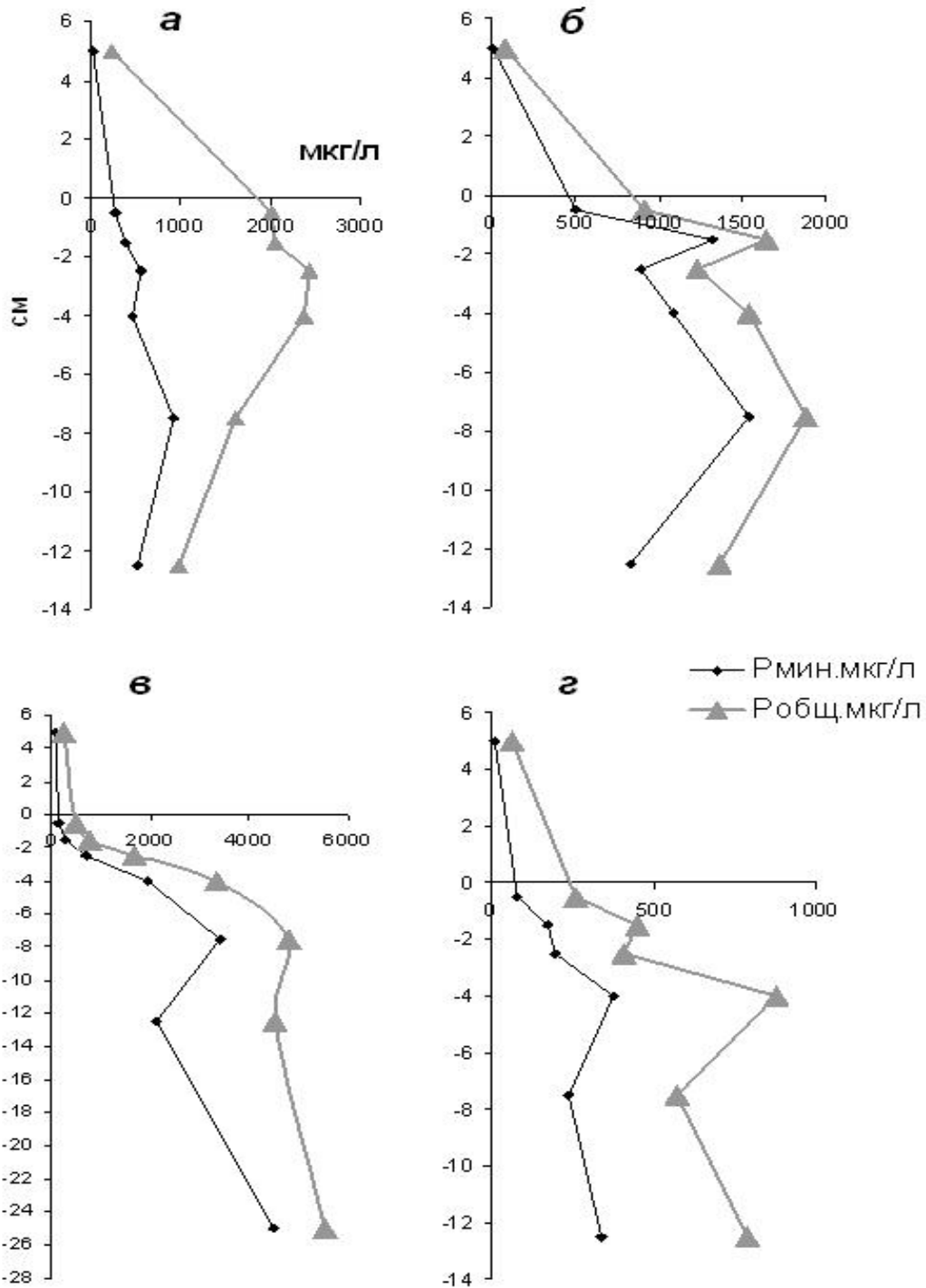


Рис. 3. Концентрационные профили растворенных форм фосфора в поровых и надилловых водах донных отложений Кондопожской губы по мере удаления от выпуска сточных вод ЦБК: а — 0,5 км, б — 9 км, в — 15 км, г — 26 км

Таким образом, вид вертикального концентрационного профиля является результатом процессов трансформации фосфорсодержащих органических и неорганических соединений в толще отложений и зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются тип донных отложений, темп осадконакопления, состав седиментационного материала, условия осадконакопления в предыдущие годы, активность бентических организмов. Полученные вертикальные концентрационные профили минеральных форм фосфора в иловых водах Кондопожской губы можно разделить на три типа. Первый — представляет собой прямолинейный профиль, где концентрация фосфора увеличивается с увеличением глубины. На профилях второго типа выявлено наличие локальных максимумов, что свидетельствует об интенсивных преобразованиях органического вещества в слое биотурбации. Третий тип отличается наличием рудной прослойки, которая замедляет вертикальную миграцию соединений фосфора в осадке.

В ы в о д ы

1. Динамика изменения концентрации фосфора в донных отложениях Онежского озера соответствует характеру изменения внешней фосфорной нагрузки и определяется процессами эвтрофирования водоема. Уменьшение концентрации фосфора в осадках в последние 5 лет свидетельствует о процессах стабилизации экосистемы Онежского озера после периода интенсивной эвтрофикации начала 90-х годов.

2. Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озере составляет менее 20% от внешней нагрузки на водоем. Интенсивность потока изменяется от 0.001 до 3 мг Р · м⁻² · сут.⁻¹ и зависит от степени антропогенного воздействия и типа грунта. Высокие значения внутренней фосфорной нагрузки в донных отложениях районов, подверженных антропогенному воздействию, связаны с изменением процесса накопления фосфора в донных отложениях, что проявляется в разной мощности и определенной последовательности слоев, обогащенных органическими и неорганическими формами фосфора как в твердой фазе осадка, так и в иловой воде.

3. Основным механизмом удержания фосфора в донных отложениях Онежского озера являются сорбционные процессы на гидроксидах железа в области редокс-барьера. В центральных глубоководных районах озера в водную толщу возвращается около 5% поступающего фосфора. Из песков Южного Онега в результате неоднократного взмучивания, переноса и переотложения взвешенного материала обратно в воду возвращается 75% оседающего фосфора. Удерживающая способность донных отложений Петрозаводской и Кондопожской губ, испытывающих прямое воздействие сточных вод, составляет 30–50%. По мере удаления от источника загрязнения доля возврата фосфора из донных отложений в водную толщу уменьшается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Водные проблемы Севера и пути их решения // Труды Карельского научного центра РАН № 4 2011. С. 35–41.

2. Белкина Н. А., Сандман О., Игнатьева Н. В. Распределение форм фосфора в донных отложениях как показатель эвтрофирования экосистемы большого водоема (на примере Ладожского и Онежского озер) // Экологическая химия. 2006. 15 (3). С. 174–185.

3. Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 689–699.

4. Васильева Е. П. Донные отложения // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. Л.: Наука, 1990. С. 147–175.

5. *Игнатъева Н. В.* Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро — прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 148–156.
6. *Калинкина Н. М., Белкина Н. А., Полякова Т. Н., Сярки М. Т.* Биоиндикация состояния глубоководных участков Петрозаводской губы Онежского озера по показателям макрозообентоса // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 488–495.
7. *Мартынова М. В.* Донные отложения как составляющая лимнических систем: М.: Наука, 2010. 243 с.
8. *Мизандронцев И. Б.* Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 175 с.
9. *Сабылина А. В., Лозовик П. А., Зобков М. Б.* Химический состав воды Онежского озера и его притоков как индикатор экологического состояния // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 6. С. 717–772.
10. *Семенович Н. И.* Донные отложения Онежского озера. Л., 1973. 104 с.
11. *Bengtsson L.* Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment // Verh. Internat. Verein. Limnol. 1975. № 19. P. 1107–1116.
12. *Bostrom B., Jansson M. & Forsberg C.* Phosphorus release from lake sediments // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 1982. № 18. P. 5–59.
13. *Cornwell J. C.* The geochemistry of manganese, iron and phosphorus in an arctic lake // Diss. abst. int. pt. B.-Sci. & Eng. 1985. 45(9). 249 p.
14. *Hartikainen H.* Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments // J. Sci. Agr. Soc. Finland 1979. № 51. P. 535–624.
15. *Hutchinson G. E.* The phosphorus cycle in lakes // A treatise of limnology. NY, 1957. V. 1. C. 12. P. 727–752.
16. *Manning P. G.* Phosphate ion interactions at the sediment-water interface in Lake Ontario: relationship to sediment adsorption capacities // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1987. № 44. P. 2204–2211.
17. *Williams J. D.H. & Mayer T.* Effect of sediment diagenesis and regeneration of phosphorus with special reference to lakes Erie and Ontario // Nutrients in natural waters. NY, 1972. P. 281–316.

REFERENCES

1. *Belkina N. A.* Rol' donnyh otlozhenij v protsessah transformatsii organicheskogo veshchestva i biogennyh elementov v ozernyh ekosistemah // Vodnye problemy Severa i puti ih reshenija // Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. 2011. № 4. S. 35–41.
2. *Belkina N. A., Sandman O., Ignat'eva N. V.* Raspredelenie form fosfora v donnyh otlozhenijah kak pokazatel' evtrofirovaniya ekosistemy bol'shogo vodoema (na primere Ladozhskogo i Onezhskogo ozer) // Ekologicheskaja himija. 2006. 15 (3). S. 174–185.
3. *Belkina N. A.* Retrospektivnaja otsenka donnyh otlozhenij Kondopozhskoj guby Onezhskogo ozer // Vodnye resursy. 2005. Т. 32. № 6. S. 689–699.
4. *Vasil'eva E. P.* Donnye otlozhenija // Ekosistema Onezhskogo ozer i tendentsii ee izmenenija. L.: Nauka, 1990. S. 147–175.
5. *Ignat'eva N. V.* Rol' donnyh otlozhenij v krugovorote fosfora v ozernoj ekosisteme // Ladozhskoe ozero — proshloe, nastojashchee, budushchee. SPb.: Nauka, 2002. S. 148–156.
6. *Kalinkina N. M., Belkina N. A., Poljakova T. N., Sjarki M. T.* Bioindikatsija sostojanija glubokovodnyh uchastkov Petrozavodskoj guby Onezhskogo ozer po pokazateljam makrozoobentosa // Vodnye resursy. 2013. Т. 40. № 5, S. 488–495.
7. *Martynova M. V.* Donnye otlozhenija kak sostavljajushchaja limnicheskikh sistem: M.: Nauka, 2010. 243 s.
8. *Mizandrontsev I. B.* Himicheskie protsessy v donnyh otlozhenijah vodoemov. Novosibirsk: Nauka, 1990. 175 s.
9. *Sabylina A. V., Lozovik P. A., Zobkov M. B.* Himicheskij sostav vody Onezhskogo ozer i ego pritokov kak indikator ekologicheskogo sostojanija // Vodnye resursy. 2010. Т. 37. № 6. S. 717–772.
10. *Semenovich N. I.* Donnye otlozhenija Onezhskogo ozer. L., 1973. 104 s.
11. *Bengtsson L.* Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment // Verh. Internat. Verein. Limnol. 1975. № 19. P. 1107–1116.

-
12. *Bostrom B., Jansson M. & Forsberg C.* Phosphorus release from lake sediments // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 1982. № 18. P. 5–59.
 13. *Cornwell J. C.* The geochemistry of manganese, iron and phosphorus in an arctic lake // Diss. abst. int. pt. B.-Sci. & Eng. 1985. 45(9). 249 p.
 14. *Hartikainen H.* Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments // J. Sci. Agr. Soc. Finland 1979. № 51. P. 535–624.
 15. *Hutchinson G. E.* The phosphorus cycle in lakes // A treatise of limnology. NY, 1957. V. 1. C. 12. P. 727–752.
 16. *Manning P. G.* Phosphate ion interactions at the sediment-water interface in Lake Ontario: relationship to sediment adsorption capacities // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1987. № 44. P. 2204–2211.
 17. *Williams J. D.H. & Mayer T.* Effect of sediment diagenesis and regeneration of phosphorus with special reference to lakes Erie and Ontario // Nutrients in natural waters. NY, 1972. P. 281–316.

**Г. А. Воробейков, В. Н. Бредихин,
В. Н. Лебедев, В. С. Юргина**

БИОЛОГИЯ КРИТИЧЕСКОГО ПЕРИОДА РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НАРУШЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ

(К 100-летию со дня рождения профессора В. В. Аникиева)

Проведено обобщение многолетних исследований, выполненных на кафедре ботаники РГПУ им. А. И. Герцена, по биологии критического периода растений к недостатку и к избытку влаги в почве и к приемам повышения устойчивости к их действию, включая использование минеральных удобрений, синтетических регуляторов роста и ассоциативных ризобактерий. Показано, что рациональное использование агрохимических и биологических приемов способствует стабилизации физиолого-биохимических процессов и сохранению общей и семенной продуктивности растений.

Ключевые слова: критический период, засуха, переувлажнение почвы, минеральные удобрения, фиторегуляторы, ассоциативные ризобактерии, устойчивость.

G. Vorobeikov, V. Bredikhin, V. Lebedev, V. Urgina

CRITICAL PERIOD BIOLOGY OF PLANTS IN THE CONDITIONS VIOLATING SOIL HUMIDITY

The article summarizes the research conducted at the Department of Botany at Herzen State Pedagogical University concerning biology of the critical period of plant caused by the lack or excess of moisture in the soil and the improvement of their sustainability, including the use of mineral fertilizers, synthetic growth regulators and associative rhizobacteria. It is shown that the rational use of agrochemical and biological techniques contributes to the stabilization of physiological-biochemical processes and preservation of general and seed productivity of plants.

Keywords: critical period, drought, waterlogging of soil, mineral fertilizers, phytoregulators, associative rhizobacteria, stability.

Одним из приоритетных погодных факторов, часто действующих в период вегетации и снижающих продуктивность растений, является засуха. Ее действие в нашей стране ежегодно распространяется на большие территории, приносит огромный ущерб народному