

ГИДРОХИМИЯ ВОД И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

УДК 551.312:54 (282.247.212)

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭКОСИСТЕМЫ ВОДОЕМА

**Н. А. Белкина, Д. А. Субетто, Н. А. Ефременко, М. С. Потахин,
Н. В. Кулик**

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

На основании данных по химическому составу донных отложений аккумуляционных зон северной части Ладожского озера установлено, что в глубоководном районе в поверхностном окисленном слое донных отложений происходит накопление биогенных элементов, содержание которых увеличивается с глубиной водоема и степенью дисперсности осадка. В заливах, подвергающихся значительному антропогенному воздействию, встречаются восстановленные донные отложения, характеризующиеся более высокими показателями потребления кислорода илом, скорости деструкции органического вещества и потоков элементов, поступающих из донных отложений в воду. Изменения в распределении элементов по вертикали осадков указывают на то, что антропогенное влияние на водоем сравнимо с действием природных факторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: донные отложения; биогенные элементы; эвтрофирование.

**N. A. Belkina, D. A. Subetto, N. A. Efremenko, M. S. Potakhin, N. V. Kulik.
THE CHEMICAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS IN NORTHERN
LAKE LADOGA AS AN INDICATOR OF LONG-TERM VARIATIONS IN THE
LAKE ECOSYSTEM**

The chemical composition of Lake Ladoga sediments was studied. Nutrients were found to accumulate in the oxidized top layer of the sediments in the deep-water part of the lake. The content of P, N, Fe, Mn increased with water depth and where the sediments had a finer particle size composition. Bays exposed to considerable human impact contained sediments formed under reducing conditions, with higher oxygen demand and high rates of organic matter decomposition. Nutrient flows from the sediments to the water column corresponded to the level typical of eutrophic lakes. Changes in the distribution of nutrients down the sediment suggest that human activities in the catchment, even if short-term, are comparable in effect with the action of natural-climatic and tectonic factors.

Key words: sediments; nutrients; eutrophication.

Введение

Ладожское озеро – крупнейший водоем Европы, охрана водных ресурсов которого объявлена стратегической задачей. На водосборной территории озера отмечается высокий уровень хозяйственной деятельности. Водоем используется для судоходства, товарного рыбоводства и рыбного промысла, служит источником питьевого, коммунально-бытового, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения и приемником сточных вод. Основной проблемой Ладожского озера является эвтрофирование [Озера..., 2013]. Интенсивная хозяйственная деятельность на водосборе и эксплуатация водных ресурсов озера во второй половине 20 века привели к резкому изменению трофического статуса водоема от олиготрофного к мезотрофному. Развитие процессов эвтрофирования в результате увеличения внешней биогенной нагрузки на озеро приводит к возрастанию количества детрита, поступающего на дно водоема. В свою очередь увеличение скорости седиментации органических веществ и биогенных элементов приводит к возрастанию интенсивности обменных процессов на границе вода-дно и увеличению внутренней биогенной нагрузки на водоем. История исследования процессов поступления биогенных веществ из донных отложений в воду насчитывает уже полвека [Bannerman et al., 1974; Россолимо, 1975; Bengtsson, 1975; Bostrom et al., 1982; Manning, Lum, 1983; Мартынова, 1984, 2010; Cornwell, 1985; Manning, 1987; Жукова, 2001; Выхристюк, Варламова, 2003 и др.]. Для Ладожского озера в работах Н. В. Игнатъевой было показано, что, несмотря на снижение внешней фосфорной нагрузки в начале девяностых годов, внутренняя нагрузка возросла. Так, суммарное поступление фосфора из донных отложений Ладожского озера в период 1959–1962 гг. оценивалось в 243 т/год, с 1985–1990 гг. – в 600 т/год. К 2000 г. эта величина достигла 875 т фосфора в год [Игнатьева, 2002].

В настоящее время по сравнению с восьмидесятыми годами прошлого века внешняя фосфорная нагрузка на Ладожское озеро уменьшилась в 2 раза (3000 т в год). Но проблема антропогенного эвтрофирования водоема остается актуальной. В 2013 г. лабораторией гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН была проведена оценка внешней биогенной нагрузки от точечных источников загрязнения и речного стока с территории карельского побережья. Исследования показали, что в настоящее время поступление азота в Ладожское озеро определяется природными факторами, поступление

взвешенных веществ и фосфора более чем на 50 % связано с антропогенными источниками. Главными причинами являются вынос фосфора с бывших сельхозугодий, рыбоводство и активное освоение побережья в рекреационных целях [Сточные воды..., 2014].

Цель данного исследования – выявление закономерностей накопления органического вещества, биогенных (P, N) и литофильных (Fe, Mn) элементов в поверхностном слое донных отложений северной части Ладожского озера в зависимости от степени антропогенного воздействия.

Северная Ладога делится на шхерную и глубоководную части. Распределение донных отложений по дну озера носит очаговый характер и определяется морфологией озерной котловины. Подводные гряды препятствуют обмену осадочным материалом между отдельными котловинами, которые таким образом представляют своеобразные конечные седиментационные бассейны для локальных источников загрязнения – промышленных объектов Приозерска, Сортавалы, Лахденпохьи, Питкяранты и др. Скорость современного осадконакопления в зоне максимальных глубин открытой части района изменяется от 0 до 1 мм год⁻¹, большие значения скоростей отмечены в ряде прибрежных районов, испытывающих антропогенное воздействие (районы г. Питкяранта – 1,6 мм год⁻¹; пос. Ляскеля – 1,5 мм год⁻¹; г. Сортавала – 1,0 мм год⁻¹) [Семенович, 1966; Субетто, 2002].

Объект и методы исследований

Исследования донных отложений проводились в северной части Ладожского озера. В представленной работе использованы данные химического анализа 200 проб донных отложений, полученные в рамках программ мониторинга в 1992–2006 гг., международных проектов «Эвтрофирование больших озер» (1997–1998 гг.) и «ПЛОТ – палеоолиминологический трансект» (2013 г.). Схема станций наблюдения представлена на рис. 1. Отбор проб донных отложений осуществлялся поршневой трубкой (модифицированный вариант стратометра Алексона [Накансон, Jansson, 1983]). Химические анализы выполнены в лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. В пробах измерялись величины pH и Eh, визуально оценивалась мощность окисленного слоя. В образцах натуральной влажности определялись: естественная влажность, потребление кислорода илом (ПК) (экспозиция в течение суток, скляночный метод), аммонийный азот, железо общее, марганец и минеральный

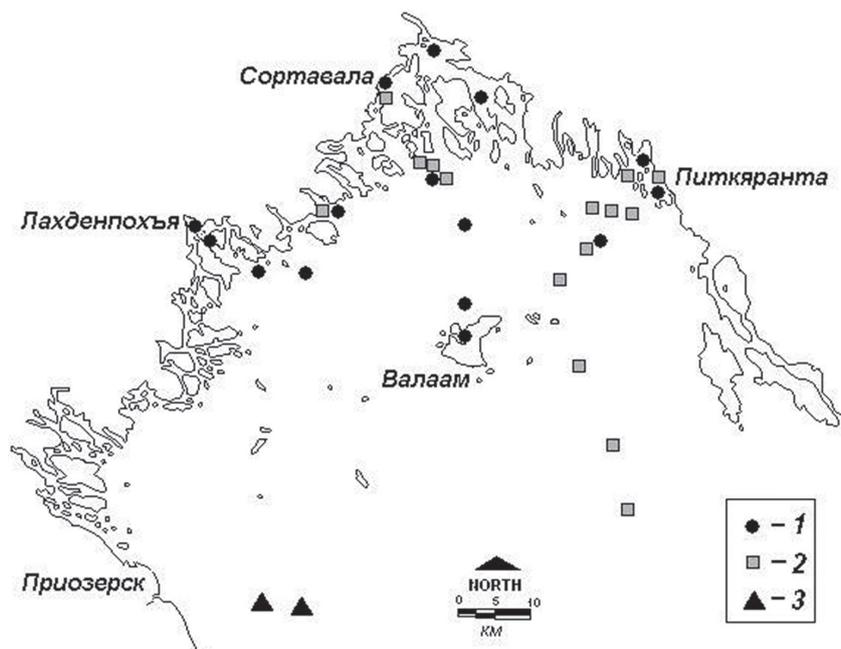


Рис. 1. Станции отбора проб донных отложений в Северной части Ладожского озера: 1 – 1992–2006 гг., 2 – 1997–1998 гг., 3 – 2013 г.

фосфор, растительные пигменты и феофитин. В воздушно-сухих образцах – потери при прокаливании (ППП), азот органический ($N_{орг.}$) (метод Кьельдаля) и фосфор общий ($P_{общ.}$), органический углерод (по ХПК) [Аринушкина, 1970].

Результаты и их обсуждение

На основании химического состава донных отложений, и в первую очередь по низкой величине ППП и небольшому содержанию $C_{орг.}$, в настоящее время в северной части Ладожского озера идет накопление минеральных донных отложений (табл.). Различие седиментационных обстановок в водоеме определяет разнообразие донных отложений. На формирование донных отложений заливов значительное

влияние оказывают речной сток, рассеянные и точечные источники загрязнения. В районах, подвергавшихся ранее и испытывающих в данный момент влияние промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод предприятий лесной и целлюлозно-бумажной промышленности (Сортавальский, Питкярантский и Якимварский заливы), встречаются донные отложения с относительно высоким содержанием органических веществ и восстановительными условиями среды. Максимум органического вещества за весь период наблюдения был зафиксирован в 1993 году в районе сброса сточных вод Питкярантского целлюлозного завода ($C_{орг.}$ – 10,8 %, ППП – 24 %, здесь и далее все расчеты выполнены на воздушно-сухой вес осадка). В таких осадках, как правило, преобладают

Физико-химические характеристики поверхностного (0–1 см) слоя донных отложений северной части Ладожского озера (1998–2013 гг.)

Показатель	Профундаль	Деклиналь	Заливы
pH	5,91–6,48	5,94–6,68	6,21–6,45
Eh, мВ	+230...+380	+30...+320	+90...+220
Естественная влажность, %	88–93	82–94	85–89
ППП, %	15–23	12–17	10–24
$C_{орг.}$, %	3,1–6,2	2,5–3,5	2,3–10,3
$Chla$, мкг \times г $^{-1}$	2–4	2–8	7–170
$P_{общ.}$, %	0,18–0,21	0,10–0,23	0,21–0,23
$P_{мин.}$, %	0,06–0,28	0,07–0,29	0,12–0,35
$N_{орг.}$, %	0,40–0,50	0,12–0,46	0,40–0,41
$N-NH_4^+$, %	0,04–0,10	0,02–0,04	0,02–0,16
Fe, %	2,1–6,7	2,1–9,4	2,0–6,4
Mn, %	0,4–4,3	0,2–1,4	0,1–0,2

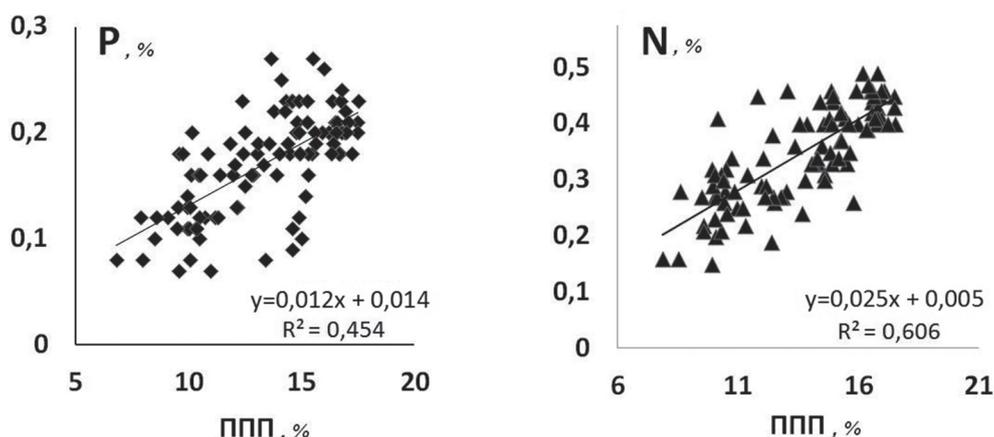


Рис. 2. Зависимость содержания фосфора общего и азота органического в донных отложениях Ладожского озера от потери при прокаливании

неорганические формы азота и фосфора [Белкина, Васильева, 1999].

В открытой части северной Ладоги особенности переноса и осаждения взвесей обуславливаются циклональным характером плотностных течений. Горизонтальный перенос в зону наибольших глубин происходит медленно, и именно деклинальная зона является местом первоначального накопления взвесей. Результатом таких особенностей седиментогенеза является пестрота в распределении осадков и отсутствие значимых различий в содержании изученных компонентов в поверхностном слое донных отложений профундали и деклинали (табл.).

Исследование пространственного и вертикального распределения химических элементов на геохимическом барьере (слой донных отложений 0–15 см) в северной части Ладожского озера в 1997–2004 гг. показало, что содержание $C_{орг.}$ (от 0,4 до 6 %), $P_{общ.}$ (от 0,05 до 0,7 %), $N_{общ.}$ (от 0,05 до 4 %), Fe (от 1 до 8 %), Mn (от 0,05 до 2 %) в донных отложениях достигает значений выше кларковых и, как правило, увеличивается с глубиной водоема и степенью дисперсности осадка. Наиболее высокое содержание органического вещества отмечено в осадках северного шхерного района, особенно в высокопродуктивном Сортавальском заливе ($C_{орг.}$ – 6 %, Chl *a* – 170 мкг/г, C: N – 20, C: P – 40) и заливе Хиденселькя ($C_{орг.}$ – 6 %, Chl *a* – 20 мкг/г, C: N – 40, C: P – 60). Количественный и качественный составы органического вещества деклинальной и профундальной зон близки (средние значения $C_{орг.}$ – 3 %, Chl *a* – 3 мкг/г, C: N – 10, C: P – 80). Поступление азота в донные отложения обычно связано с седиментацией органического вещества. На поступление фосфора в донные отложения водоемов гумидной зоны влияет не только органическое вещество, но и седиментация

железосодержащих взвесей. Поэтому зависимость содержания этих элементов в осадке от ППП в случае азота имеет более высокий коэффициент детерминации (рис. 2). В работе, опубликованной ранее [Белкина, 2011], было показано, что донные отложения заливов характеризуются более высокими показателями потребления кислорода илом (до $1,6 \text{ г O}_2 \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$) и скоростями деструкции органического вещества (до $2,1 \text{ г C} \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$). Потребность в кислороде донных отложений открытой части изменяется от 0,05 до $1 \text{ г O}_2 \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$, скорость разложения органического вещества – от 0,02 до $0,2 \text{ г C} \times \text{м}^{-2} \text{сутки}^{-1}$.

Низкие скорости осадконакопления, а также количественный и качественный состав органического вещества, поступающего в донные отложения открытой части озера, являются причиной того, что повсеместно на окислительно-восстановительной границе отмечается образование рудных прослоек, обогащенных марганцем, железом и фосфором. Процессы трансформации органического вещества в донных отложениях открытой части озера в отличие от заливов происходят в окислительной среде. Мощность окисленного слоя достигает 5 см. Окрашенные соединения железа и марганца позволяют визуально определить положение геохимического барьера в донных отложениях. Значения окислительно-восстановительного потенциала поверхностного окисленного слоя донных отложений на 200–300 мВ выше, чем значения Eh осадков, залегающих в глубине колонки. Вертикальное распределение биогенных элементов в донных отложениях и поровых водах графически описывается кривыми нескольких типов – от монотонно убывающих или возрастающих по толщине керна до графиков с ярко выраженными минимумами или максимумами на разной глубине (рис. 3).

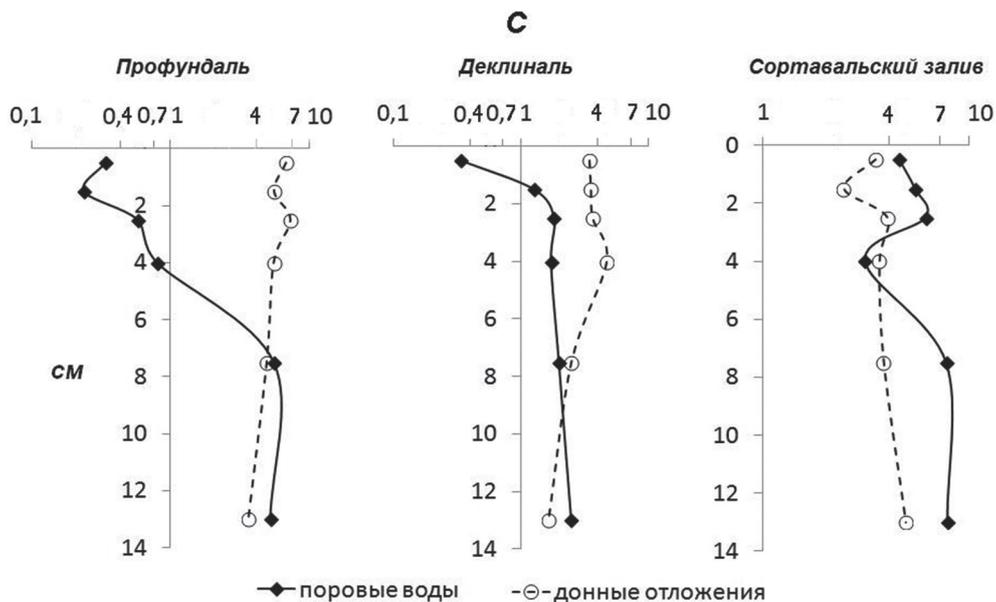


Рис. 3. Распределение железа в поровых водах (мгFe/л) и в донных отложениях (%) Ладожского озера

Наиболее резкие изменения содержания этих элементов отмечены в зоне окислительно-восстановительного барьера. Максимум Eh, как правило, соответствует максимуму содержания марганца. Далее мы наблюдаем максимумы концентраций железа и фосфора. Удержание фосфора в донных отложениях глубоководного района происходит главным образом за счет увеличения доли железо-связанного фосфора (до 40 % от общего) [Белкина и др., 2006]. Что касается «транзитной» зоны, то, к примеру, на выходе из Сортавальского залива, в зоне активных течений, наблюдалась инверсия профиля Eh: поверхностный слой осадка имел более низкие значения Eh, чем на глубине [Белкина, 2014]. В заливах, подверженных антропогенному влиянию, положение редокс-границы совпадает с границей раздела вода-дно, что приводит к иммобилизации и концентрации редокс-чувствительных элементов в поверхностном слое донных отложений. В результате фосфор поступает в воду не только в ходе деструкции фосфорсодержащих органических соединений, но и за счет восстановления соединений железа и высвобождения Fe-связанного фосфора. В ходе исследований было выявлено, что в районах, подверженных влиянию точечных источников загрязнения, 30 % фосфора, поступающего на дно, возвращается в воду. Величина потока ($1 \text{ мг P/м}^2 \text{ сут.}^{-1}$) более чем на порядок превышает значения потоков фосфора из донных отложений открытой части озера. Донные отложения глубоководного района обладают высокой удерживающей способностью и минимальной отдачей биогенных элементов в воду [Белкина и др., 2006].

Сравнение характеристик донных отложений профундали северной части Ладожского озера, полученных в двухтысячные годы, с результатами вертикального распределения элементов в колонках донных отложений, отобранных в 2013 г., показало, что в настоящее время в донных отложениях Ладожского озера наметилась тенденция снижения концентрации биогенных элементов в поверхностном слое, а следовательно, и уменьшение их поступления из донных отложений обратно в воду. Уменьшились значения потребления кислорода илом. Такие изменения в составе седиментационного материала, накапливающегося в донных отложениях, связаны с уменьшением продукционных процессов в озере. Более высокие концентрации органического вещества, поступившего в донные отложения в период антропогенного эвтрофирования в восьмидесятые годы прошлого столетия, привели к развитию восстановительных процессов и перераспределению железа и марганца по вертикали в поверхностном (0–15 см) слое осадка. Локальные максимумы железа (3 % в слое 3–5 см) и фосфора общего (0,4 % в слое 8–10 см) соответствуют максимумам концентраций этих элементов на глубине 30 см (рис. 4). Концентрация азота и значения ППП в этом слое монотонно убывают с глубиной. Содержание марганца (1 %) в поверхностном слое на порядок превышает его среднее содержание по колонке. Образование рудных прослоев, начало формирования которых зафиксировано в поверхностном слое вышеуказанной колонки, способствует захоронению веществ в донных отложениях и снижению внутренней биогенной нагрузки,

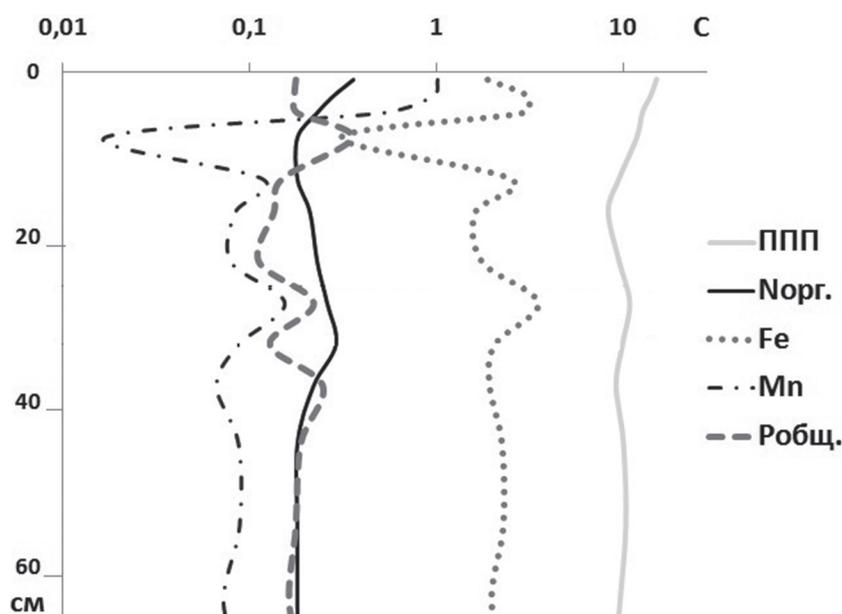


Рис. 4. Распределение Fe, Mn, $P_{\text{общ.}}$, $N_{\text{орг.}}$, ППП в донных отложениях Ладожского озера, 2013 г.

а следовательно, и снижению продукционных процессов в водоеме.

Естественные изменения трофического статуса экосистемы Ладожского озера в голоцене, связанные с колебаниями климата, происходили на протяжении 7000 лет с момента дегляциации котловины в результате потепления при переходе от сухого холодного климата позднедриасового периода до влажного и теплого атлантического периода (олиготрофный → мезотрофный). Последующие 3000 лет, по-видимому, мог наблюдаться обратный процесс (мезотрофный → олиготрофный) в результате похолодания климата при переходе от атлантического периода к суббореальному, а затем снова усиление процесса эвтрофикации в результате как потепления климата, так и усиления антропогенного влияния в последнее столетие. Резкое изменение характера накопления органического вещества в донных отложениях, связанное с геологическими процессами, произошло 3100 л. н., когда в результате прорыва р. Невы снизился уровень озера. Изменение продукционных процессов в водоеме отражается на вертикальном распределении органического вещества и биогенных элементов по колонке донных отложений: локальные максимумы соответствуют увеличению продукции, локальные минимумы – ее снижению. Концентрационный профиль $N_{\text{орг.}}$ и ППП указывает на устойчивый рост продукционных процессов в озере на протяжении последних 2000 лет. Формирование в пограничной зоне прослоек, обогащенных Mn и Fe, является индикатором снижения скорости поступления органических веществ

в донные отложения в настоящее время. Наиболее вероятной причиной уменьшения продукции экосистемы в настоящее время является снижение внешней биогенной нагрузки. Можно предположить, что если внешняя нагрузка не увеличится, то в донных отложениях продолжится формирование рудного прослоя, способствующего захоронению и изъятию органического вещества и биогенных элементов из круговорота в экосистеме. Если же продукция экосистемы возрастет и в донные отложения поступит органическое вещество, достаточное для того, чтобы восстановить Fe и Mn запирающего слоя, резко возрастет внутренняя биогенная нагрузка, причем поступить в водную толщу потенциально способен весь пул биогенных элементов, накопленных за длительный период в поверхностном (0–15 см) слое.

Заключение

В настоящее время в глубоководном районе северной части Ладожского озера на геохимическом барьере в поверхностном слое донных отложений происходит накопление органического вещества и биогенных элементов. В целом содержание азота, фосфора, марганца и железа увеличивается с глубиной водоема и степенью дисперсности осадка. Образование рудных прослоев, удерживающих органическое вещество и биогенные элементы в донных отложениях, способствует стабилизации, а возможно, при снижении внешней биогенной нагрузки на озеро, и понижению трофического уровня водной экосистемы.

В заливах, подвергающихся антропогенному влиянию, встречаются донные отложения с относительно высоким содержанием органических веществ и восстановительными условиями среды, характеризующимися более высокими значениями потребления кислорода илом, скорости деструкции органического вещества и потоков элементов, поступающих из донных отложений в воду.

Изменения в распределении биогенных элементов по колонке донных отложений указывают на то, что хозяйственная деятельность на водосборе Ладожского озера, даже кратковременная, сравнима с воздействием на экосистему озера природно-климатических и геологических факторов.

Авторы выражают благодарность д. х. н. П. А. Лозовику за консультационную помощь при обсуждении результатов исследования.

Литература

Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 487 с.

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. 2011. № 4. С. 35–41.

Белкина Н. А., Васильева Е. П. Оценка загрязненности донных отложений северной части Ладожского озера // Водные ресурсы. 1999. Т. 26, № 1. С. 112–114.

Белкина Н. А. Изменение окислительно-восстановительного состояния озерных донных отложений под влиянием антропогенных факторов (на примере Ладожского и Онежского озер) // Общество. Среда. Развитие. 2014. № 3. С. 172–176.

Белкина Н. А., Сандман О., Игнатъева 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.

Выхристюк Л. А., Варламова О. Е. Донные отложения и их роль в экосистеме Куйбышевского водохранилища. Тольятти: Самарский науч. центр РАН, 2003. 174 с.

Жукова Т. В. Потоки фосфора и азота в пограничном слое «дно-вода» и их роль в функционировании полимиктических озер: автореф. дис. ... докт. биол. наук. Минск, 2001. 39 с.

Игнатъева Н. В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 148–156.

Мартынова М. В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984. 160 с.

Мартынова М. В. Донные отложения как составляющая лимнических систем. М.: Наука, 2010. 243 с.

Озера Карелии. Справочник / Ред. Н. Н. Филатов и В. И. Кухарев. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2013. 464 с.

Россолимо Л. Л. Антропогенное эвтрофирование водоемов // Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М.: Наука, 1975. Т. 2. 860 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Ладожского озера. М.; Л.: Наука, 1966. 124 с.

Сточные воды Приладожья и притоков Ладожского озера // Государственный доклад о состоянии окружающей среды Республики Карелия в 2013 г. Петрозаводск, 2014. С. 65–68.

Субетто Д. А., Игнатъева Н. В., Давыдова Н. Н. и др. Донные отложения и их роль в оценке эволюции Ладожского озера // Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее. СПб.: Наука, 2002. С. 122–164.

Bannerman R. T., Armstrong D. E., Holdren G. C., Harris R. F. Phosphorus mobility in Lake Ontario sediments (IFYGL) // Proc. 17th Conf. Great Lakes Res. 1974. P. 158–178.

Bengtsson L. Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment // Verh. Internat. Verein. Limnol. 1975. No 19. P. 1107–1116.

Bostrom B., Jansson M., Forsberg C. Phosphorus release from lake sediments // Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol. 1982. No 18. P. 5–59.

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.

Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.

Manning P. G., Lum K. R. Forms of iron, phosphorus and trace-metal ions in a layered sediment core from Lake Ontario // Can. Mineral. 1983. No 22. P. 121–128.

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. No 44. P. 2204–2211.

Поступила в редакцию 23.12.2014

References

Arinushkina E. V. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Manual on chemical analysis of soils]. Moscow: MGU, 1970. 487 p.

Belkina N. A. Rol' donnykh otlozhenii v protsessakh transformatsii organicheskogo veshchestva i biogennykh elementov v ozernykh ekosistemakh [Role of

sediments in the processes of transformation of organic matter and nutrients in lake ecosystems]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN. Vodnye problemy Severa i puti ikh resheniya* [Transactions of KarRC RAS. Water problems of the North and their solution]. 2011. No 4. P. 35–41.

Belkina N. A., Vasil'eva E. P. Otsenka zagryaznenosti donnykh otlozhenii severnoi chasti Ladozhskogo ozera [Assessment of the sediment pollution in the northern part of Lake Ladoga]. *Vodnye resursy [Water resources]*. 1999. Vol. 26, No 1. P. 112–114.

Belkina N. A. Izmenenie oksiditel'no-vosstanovitel'nogo sostoyaniya ozernykh donnykh otlozhenii pod vliyaniem antropogennykh faktorov (na primere Ladozhskogo i Onezhskogo ozer) [Changes in redox state of the lake sediments under anthropogenic load (case study of Lakes Ladoga and Onego)]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitiye [Society. Environment. Development]*. 2014, No 3. P. 172–176.

Belkina N. A., Sandman O., Ignat'eva N. V. Rasprezhenie form fosfora v donnykh otlozheniyakh kak pokazatel' evtrofirovaniya ekosistemy bol'shogo vodoema (na primere Ladozhskogo i Onezhskogo ozer) [Distribution of sedimentary phosphorus forms as an indicator of eutrophication of ecosystem in a large reservoir (case study of Lakes Ladoga and Onego)]. *Ekologicheskaya khimiya [Ecological chemistry]*. 2006. No 15 (3). P. 174–185.

Ignat'eva N. V. Rol' donnykh otlozhenii v krugovoroze fosfora v ozernoi ekosisteme [The role of bottom sediments in phosphorus cycling in lake ecosystem]. Ladozhskoe ozero: proshloe, nastoyashchee, budushchee [Lake Ladoga: past, present and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002, P. 148–156.

Martynova M. V. Azot i fosfor v donnykh otlozheniyakh ozer i vodokhranilishch [Nitrogen and phosphorus in bottom sediments of lakes and reservoirs]. Moscow: Nauka, 1984. 160 p.

Martynova M. V. Donnye otlozheniya kak sostavlyayushchaya limnicheskikh sistem [Bottom sediments as a component of limnological systems]. Moscow: Nauka, 2010. 243 p.

Ozera Karelii. Spravochnik [Lakes of Karelia. Reference book]. Eds. N. N. Filatov, V. I. Kukharev. Petrozavodsk: KarRC of RAS, 2013. 464 p.

Rossolimo L. L. Antropogennoe evtrofirovanie vodomov [Anthropogenic eutrophication of water bodies]. *Obshchaya ekologiya. Biotsenologiya. Gidrobiologiya [General ecology. Biocenology. Hydrobiology]*. Moscow: Nauka, 1975. Vol. 2. 860 p.

Semenovich N. I. Donnye otlozheniya Ladozhskogo ozera [Bottom sediments of Lake Ladoga]. Moscow; Leningrad: Nauka, 1966. 124 p.

Stochnye vody Priladozh'ya i pritokov Ladozhskogo ozera [Wastewater in Priladozhje and tributaries of Lake Ladoga]. Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy Respubliki Kareliya v 2013 g. [State report on the condition of the environment of the Republic of Karelia in 2013]. Petrozavodsk, 2014. P. 65–68.

Subetto D. A., Ignat'eva N. V., Davydova N. N., Sergeeva L. V., Krylenkova N. L. Donnye otlozheniya i ikh rol' v otsenke evolyutsii Ladozhskogo ozera [Bottom sediments and their role in assessing the evolution of Lake Ladoga]. Ladozhskoe ozero, proshloe, nastoyashchee, budushchee [Lake Ladoga: past, present and future]. St. Petersburg: Nauka, 2002. P. 122–164.

Vykhristyuk L. A., Varlamova O. E. Donnye otlozheniya i ikh rol' v ekosisteme kuibyshevskogo vodokhranilishcha [Bottom sediments and their role in the ecosystem of the Kuibyshev Reservoir]. Tol'yatti: Samarskii nauchnyi tsentr RAN, 2003. 174 p.

Zhukova T. V. Potoki fosfora i azota v pogranichnom sloe «dno-voda» i ikh rol' v funktsionirovanii polimikticheskikh ozer [Phosphorus and nitrogen flows in a boundary layer «bottom-water» and their role in polymictic lakes functioning]: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk [PhD Diss. (Biol.)]. Minsk. 2001. 39 p.

Bannerman R. T., Armstrong D. E., Holdren G. C., Harris R. F. Phosphorus mobility in Lake Ontario sediments (IFYGL). *Proc. 17th Conf. Great Lakes Res.* 1974. P. 158–178.

Bengtsson L. Phosphorus release from a highly eutrophic lake sediment. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1975. No 19. P. 1107–1116.

Bostrom B., Jansson M., Forsberg C. Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.* 1982. No 18. P. 5–59.

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.

Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.

Manning P. G., Lum K. R. Forms of iron, phosphorus and trace-metal ions in a layered sediment core from Lake Ontario. *Can. Mineral.* 1983. No 22. P. 121–128.

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. No 44. P. 2204–2211.

Received December 23, 2014

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Белкина Наталья Александровна

старший научный сотрудник, к. г. н., доцент
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: bel110863@mail.ru
тел.: (8142) 576541

CONTRIBUTORS:

Belkina, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: bel110863@mail.ru
tel.: (8142) 576541

Субетто Дмитрий Александрович

директор, д. г. н., профессор
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: subetto@mail.ru
тел.: (8142) 578464

Ефременко Наталья Анатольевна

ведущий химик
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: efremna@mail.ru
тел.: (8142) 576541

Потахин Максим Сергеевич

научный сотрудник, к. г. н.
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: potakhin@nwpi. krc.karelia.ru
тел.: (8142) 578464

Кулик Наталья Владимировна

аспирант
Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН
пр. А. Невского, 50, Петрозаводск,
Республика Карелия, Россия, 185030
эл. почта: nadiet11@rambler.ru
тел.: (8142) 576541

Subetto, Dmitry

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: subetto@mail.ru
tel.: (8142) 578464

Efremenko, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: efremna@mail.ru
tel.: (8142) 576541

Potakhin, Maksim

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: potakhin@nwpi. krc.karelia.ru
tel.: (8142) 578464

Kulik, Natalia

Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
50 A. Nevsky St., 185030 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: nadiet11@rambler.ru
tel.: (8142) 576541