

УДК 556.114.7: 556.55

РОЛЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ТРАНСФОРМАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Н. А. Белкина

Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Дана количественная оценка накопления и трансформации органических веществ и биогенных элементов в озерных донных отложениях на примере осадков 100 озер Карелии. Установлено, что аккумуляция органического вещества и азота органического в донных отложениях соответствует трофическому статусу водоема и закономерно увеличивается от олиготрофного типа к эвтрофному, тогда как в распределении фосфора не наблюдается отличий. Поглощение кислорода донными отложениями и интенсивность потоков на границе вода – дно также зависят от уровня трофии водоемов.

Ключевые слова: донные отложения, органическое вещество, биогенные элементы.

N. A. Belkina. ROLE OF SEDIMENTS IN THE PROCESSES OF TRANSFORMATION OF ORGANIC MATTER AND NUTRIENTS IN LAKE ECOSYSTEMS

The quantitative assessment of accumulation and transformation of organic substances and nutrients in lake sediments was carried out through comparative analysis of data on 100 lakes of Karelia. We found that accumulation of organic matter and nitrogen in the sediments agrees with the trophic status of the lake, and naturally increases from the oligotrophic to the eutrophic type, whereas no differences were observed in the distribution of phosphorus. Oxygen absorption by sediments and the intensity of the flux at the water-sediments boundary depends on the trophic status of the lake.

Key words: sediments, organic matter, nutrients.

Введение

Донные отложения являются природной биогеохимической барьерной зоной, играющей важную роль в процессах передачи вещества и энергии в водных экосистемах. Донные осадки формируются в результате оседания на дно водоема твердых частиц разного генезиса. В процессе седиментации эти частицы подвергаются сложному совокупному воздействию физических, химических и биологических факторов, действие которых продолжается и после

осаждения частиц на дно. Основная роль донных отложений в экосистеме водоема сводится к изъятию вещества из воды вследствие его седиментации и возврату определенной части этого вещества в водоем в результате диагенетических процессов в минеральных формах. Иными словами, донные отложения, с одной стороны, избавляют экосистему водоема от избытка органического вещества, с другой стороны, составляют ресурсы, необходимые продуцентам.

Определяющую роль в функционировании экосистемы водоема играют химические

элементы, входящие в состав живого вещества (C, N, P, O). Наиболее важными процессами, протекающими в донных отложениях и оказывающими влияние на состояние экосистемы, являются процессы разложения органического вещества, потребления кислорода и поступления биогенных элементов в водную массу озера. В отличие от водного раствора реакции в осадках протекают медленно, в связи с более низкими температурами и гетерогенностью системы равновесие устанавливается не сразу, а за более длительный промежуток времени. На трансформацию вещества в донных отложениях оказывают влияние физико-географические условия среды осадкообразования, скорость осадконакопления, минералогический и химический состав абиогенного материала, количественный и качественный состав органического вещества, поступающего в донные отложения, и деятельность донных организмов, участвующих в процессе его трансформации.

Целью данной работы является установление закономерностей процессов накопления и трансформации органического вещества и биогенных элементов в донных отложениях разнотипных озер Карелии.

Объекты и методы исследования

В работе использованы данные коллекции ИВПС КарНЦ РАН (1965–2009 гг.) по химическому составу донных отложений 98 озер Карелии с площадью более 1 км² и до 100 км², а также больших озер – Онежского и Ладожского. Особенности накопления органического вещества (ОВ) и биогенных элементов в донных отложениях изучались на водоемах, отличающихся трофическим статусом, гидрологическими и морфометрическими характеристиками, разными покровными породами и площадями водосборов.

Отбор проб донных отложений осуществлялся поршневой трубкой (модифицированный вариант стратометра Алексона [Håkanson, Jansson, 1983]). В пробах измерялись величины pH и Eh [Семенов, 1977], толщина окисленного слоя оценивалась визуально. В образцах натуральной влажности определялись: естественная влажность, пористость и удельная масса [Аринушкина, 1970], потребление кислорода илом (ПК) (экспозиция в течение суток, скляночный метод), аммонийный азот, железо общее, марганец и минеральный фосфор ($P_{\text{лаб}}$ – экстракция из сухого грунта персульфатом аммония и $P_{\text{мин}}$ – экстракция из влажного грунта в кислой среде), растительные пигменты (Chl a, b, c) и феофитин. В воздушно-сухих об-

разцах – потери при прокаливании (П.П.П.), азот органический ($N_{\text{орг}}$) (метод Кьельдаля) и фосфор общий ($P_{\text{общ}}$), органический углерод ($C_{\text{орг}}$) [Аринушкина, 1970].

Оценку потребления кислорода донными отложениями Ладожского и Онежского озер (где концентрация кислорода в придонном слое воды почти не меняется в течение года), наряду с указанным выше методом, также проводили расчетным методом: $F = -(D_0 \cdot k \cdot C_0 \cdot z^2) \ln(C_z \cdot C_0^{-1}) + V \cdot C_0$, где F – поток кислорода в донные отложения, D_0 – коэффициент диффузии O_2 , k – пористость, z – мощность окисленного слоя, C_0 и C_z – концентрации O_2 на поверхности и на глубине z , V – скорость осадконакопления [Мизандронцев, 1990].

Поступление вещества из донных отложений в воду (внутренняя нагрузка) было рассчитано балансовым методом [Игнатьева, 2002]: $J = J_s - J_b$, $J_i = C_i \cdot M_{\text{уд}} \cdot V$, где J_s – поток седиментации; J_b – поток захоронения; C_i – концентрация элемента в донных отложениях (для J_s – в поверхностном, для J_b – на глубине ~10 см); $M_{\text{уд}}$ – удельная масса осадка; V – скорость осадконакопления. Последнюю вычисляли по формуле: $V = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d^2 \cdot \mu^{-1} \cdot 18^{-1}$, где ρ_s , ρ – плотность донных отложений и воды, соответственно; d – размер частиц, $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$; μ – вязкость воды [Håkanson, Jansson, 1983].

Удерживающая способность донных отложений оценивалась по относительному изменению концентрации элемента с глубиной R : $R = (C_0 - C_z)/C_0$ и коэффициенту аккумуляции K : $K = C_z/C_0$.

Скорость аэробной деструкции ОВ в поверхностном слое донных отложений определялась по уравнению распада ОВ планктона в кислородных условиях (на 106 атомов С требуется 138 молекул O_2) [Драйвер, 1985].

Результаты и обсуждение

Донные отложения озер Карелии в основном представлены тремя типами осадков: песчано-гравийными, отлагающимися в зоне литорали, глинистыми грунтами и илами (преобладающий тип). Донные отложения зон аккумуляции исследованных озер в основном относятся к минеральным илистым осадкам со средним содержанием в них: $C_{\text{орг}}$ – 12 %, $N_{\text{орг}}$ – 1 %, $P_{\text{общ}}$ – 0,19 %, Fe – 2 %, Mn – 0,4 % (здесь и далее химический состав рассчитан на воздушно-сухой вес осадка). Сопоставление данных для водоемов разного трофического уровня показало, что накопление ОВ и $N_{\text{орг}}$ в донных отложениях соответствует трофическому статусу озер и закономерно увеличивается от олиготрофно-

го типа к эвтрофному (табл. 1). Максимальное содержание ОВ обнаружено в высокогумусных водоемах эвтрофного типа с гидрокарбонатным классом вод группы кальция. Такая картина наблюдается в темно-зеленых детритных илах мелководных озер, к примеру, оз. Сарозеро, где содержание $C_{орг}$ достигает 28 %, $N_{орг}$ – 2 %. Минимальное содержание ОВ в донных отложениях обнаружено в олиготрофных мезогумусных слабощелочностных слабокислых озерах с гидрокарбонатным классом вод группы кальция и натрия. К примеру, в оз. Сундозеро $C_{орг}$ – 1,3 %, $N_{орг}$ – 0,1 %.

Таблица 1. Средние значения содержания ОВ и биогенных элементов в иловых отложениях озер Карелии, %

Тип водоема	Число озер	$C_{орг}$	ОВ	$N_{орг}$	$N_{NH_4}^+$	$P_{лаб}$	$P_{общ}$
Олиготрофные	23	8	18	0,7	0,03	0,04	0,22
Мезотрофные	48	12	22	1,0	0,03	0,04	0,17
Эвтрофные	27	15	28	1,4	0,03	0,04	0,22

Отличий в распределении $P_{лаб}$ и $P_{общ}$ в озерах разной трофии не наблюдается. Причиной этого, вероятно, является высвобождение и поступление обратно в воду фосфатов, сорбированных на гидроксидах Fe(III), которые в бескислородных условиях восстанавливаются до подвижных форм Fe(II).

Органические вещества, приносимые с водосбора и образующиеся в самом водоеме в результате жизнедеятельности животных и растительных организмов, прежде чем поступить в донные отложения, подвергаются различным физико-химическим и биологическим превращениям в водной толще. Степень трансформации определяется рядом абиотических (гидро-

логических, геологических, гидрохимических) и биотических факторов. Взвеси, поступающие в донные отложения эвтрофных озер, судя по составу поверхностного 0–3 мм слоя осадка, отличаются высоким содержанием ОВ и биогенных элементов по сравнению с поверхностными взвесями мезотрофных озер (табл. 2). Доля $P_{мин}$ составляет 50–80 % от $P_{общ}$, а концентрации железа и марганца изменяются в пределах от 5 до 6,5 % и 0,3–0,4 %, соответственно, за исключением оз. Шотозеро (Fe – 1,9 %) и оз. Укшезеро (Mn – 0,8 %).

Содержание ОВ в поверхностном турбидированном «живом» слое донных отложений (0–5 см) эвтрофных озер было закономерно выше, чем в осадках мезотрофных озер (табл. 2). Растительные пигменты были представлены в основном продуктом разрушения хлорофилла – феофитином (рис. 1). Максимальные концентрации ОВ, биогенных элементов, растительных пигментов (Σ Chl *a*, *b*, *c* 700–420 мкг/г), высокие значения потребления кислорода (1,8–2,8 мг O_2 /г в сутки) и самые низкие величины pH (5,5–5,7) были зафиксированы в донных отложениях эвтрофных озер Вохтозеро и Пелдожское, а минимальные – в оз. Шотозеро (П.П.П. – 9,9 %, Σ Chl *a*, *b*, *c* 67 мкг/г, ПК 0,3 мг O_2 /г в сутки). Удерживающая способность донных отложений в слое 0–5 см различается мало по отношению к углероду, азоту и фосфору для эвтрофных и мезотрофных озер. В то же время более глубокие слои (14–15 см) донных отложений эвтрофных озер показали большую удерживающую способность к этим элементам по сравнению с осадками мезотрофных водоемов (табл. 2). Наименьшей удерживающей способностью (минимальные значения *K*

Таблица 2. Содержание $C_{орг}$, П.П.П. и биогенных элементов (%) в донных отложениях, коэффициент аккумуляции (*K*), удерживающая способность осадков (*R*)

Озеро	см	$C_{орг}$			П.П.П.			$P_{мин}$			$P_{общ}$			$N_{орг}$		
		%	<i>K</i>	<i>R</i>	%	<i>K</i>	<i>R</i>	%	<i>K</i>	<i>R</i>	%	<i>K</i>	<i>R</i>	%	<i>K</i>	<i>R</i>
Пелдожское	0–0,3	14,9			37,0			0,36			0,43			1,22		
	0–5	13,9	0,9	0,07	35,3	0,9	0,05	0,32	0,9	0,14	0,40	0,9	0,07	0,95	0,8	0,22
	20–21	11,8	0,8	0,21	33,0	0,9	0,11	0,30	0,8	0,17	0,48	1,1	–0,12	0,61	0,5	0,50
Вохтозеро	0–0,3	17,9			41,8			0,17			0,47			1,05		
	0–5	14,2	0,8	0,21	39,4	0,9	0,06	0,15	0,9	0,13	0,24	0,5	0,49	1,08	1,0	–0,03
	14–15	16,2	0,9	0,09	37,8	0,9	0,10	0,11	0,6	0,35	0,21	0,3	0,55	0,99	0,9	0,06
Укшезеро	0–0,3	4,0			15,0			0,13			0,22			0,18		
	0–5	3,5	0,9	0,12	12,8	0,9	0,14	0,13	1,0	0,00	0,23	1,05	–0,05	0,27	1,5	–0,50
	14–15	3,4	0,8	0,15	11,4	0,8	0,24	0,06	0,5	0,54	0,08	0,4	0,63	0,32	1,8	–0,78
Вендюрское	0–0,3	11,5			31,7			0,10			0,15			0,73		
	0–5	10,8	0,9	0,06	30,1	0,9	0,05	0,08	0,8	0,20	0,11	0,7	0,27	0,68	0,9	0,07
	13–14	2,2	0,2	0,81	12,4	0,4	0,61	0,04	0,4	0,60	0,04	0,3	0,73	0,27	0,4	0,63
	27–30	2,6	0,2	0,78	7,54	0,2	0,76	0,06	0,6	0,40	0,06	0,4	0,60	0,28	0,4	0,62
Шотозеро	0–0,3	6,2			12,5			0,07			0,13			0,15		
	0–5	5,0	0,8	0,19	9,9	0,8	0,21	0,08	1,1	–0,14	0,10	0,8	0,23	0,14	0,9	0,07
	14–15	4,3	0,7	0,30	7,1	0,6	0,43	0,06	0,9	0,14	0,08	0,6	0,38	0,10	0,7	0,33

и максимальные величины R) обладают донные отложения оз. Вендюрского, что также проявилось в образовании рудного прослоя, обогащенного железом и марганцем в области Eh-барьера. Скорости трансформации ОВ и величины потоков биогенных элементов из донных отложений в воду для эвтрофных озер были в 2–10 раз выше, чем для мезотрофных (табл. 3).

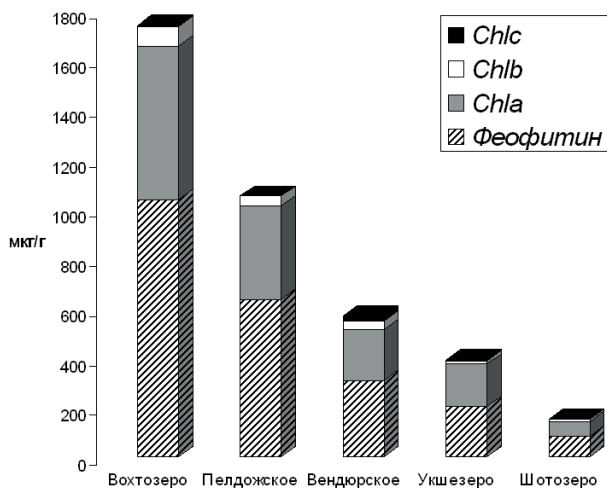


Рис. 1. Растительные пигменты в донных отложениях (0–5 см)

Таблица 3. Скорости минерализации органического вещества (C) в донных отложениях и поступление биогенных элементов (N , P) из иловых осадков в воду, скорость осадконакопления (V)

Озеро	C	N	P	V
	мг · м ⁻² в сутки			мм · год ⁻¹
Вохтозеро	54	39	31	2
Пелдожское	100	12	–	2
Вендюрское	6	5	2	0,6
Укшезеро	5	2	3	0,5
Шотозеро	6	0,4	0,4	0,2

Условия формирования донных отложений отдельных районов больших озер, прежде всего, определяются морфологией озерной котло-

вины и объемом водной массы. Так, для Онежского озера седиментогенез в Центральном и Большом Онего контролируется механическим (гидродинамическим) барьером. По данным Н. И. Семеновича [1973], органическое вещество, оседающее на дно, переносится здесь с пелитовой фракцией ($<0,01$ мм). Повенецкий залив представляет собой как бы самостоятельный водоем, где принос терригенного материала очень мал. В заливах озера широко распространены илистые осадки. Для Петрозаводской губы определяющим фактором при формировании донных отложений является взвешенный сток р. Шуи. В Кондопожской губе, особенно в вершинной ее части, велик вклад антропогенной составляющей. В этом заливе состав взвесей и состав донных отложений меняется по мере удаления от ЦБК (табл. 4). В донных отложениях в вершинной части губы на площади 5 км² в результате поступления техногенных органических продуктов со сточными водами Кондопожского ЦБК накопилось около 200 тыс. т органических веществ. Особенности химического состава осадков, характера накопления и трансформации органических веществ донных отложений позволили условно разделить акваторию губы на три части: вершинную (I) и переходную зоны (II), а также центральный глубоководный район (III). Осадки I зоны отличаются низкими значениями Eh (до –189 мВ) и рН (до 5,2), количественным и качественным составом ОВ. Содержание $C_{\text{орг}}$ в поверхностном 5 см слое отложений достигает 38 %, $N_{\text{орг}}$ – 1 %, фенолов – 55 мкг · г⁻¹, лигносульфонатов – 600 мкг · г⁻¹. В этой зоне наблюдаются величины ПК до 39 мг O_2 · г⁻¹ · сут⁻¹, отношения $C : N$ до 44 и $C : P$ до 400, а также наибольшие скорости поступления минеральных веществ из донных отложений в воду (1,3 г · м⁻² · сут⁻¹). ОВ донных

Таблица 4. Химический состав поверхностных взвесей (0–0,3 см) донных отложений Онежского озера (средние значения)

Район	Н, м	Eh, мВ	рН	Влаж.	$C_{\text{орг}}$	П.П.П.	$N-NH_4$	$N_{\text{орг}}$	Fe	Mn	$P_{\text{мин}}$	$P_{\text{общ}}$
				%								
Большое Онего	40	363	5,9	89	5,6	8,2	0,063	0,40	5,8	1,26	0,15	0,23
	100	431	6,2	92	4,9	19,7	0,022	0,40	5,6	1,58	0,14	0,20
Центральное Онего	60	458	6,8	95	4,9	18,6	0,006	0,26	3,9	0,80	0,12	0,20
	100	572	6,5	91	4,0	13,7	0,004	0,26	5,3	0,61	0,14	0,21
Заонежский залив	26	509	6,5	89	2,2	11,8	0,004	0,33	5,4	0,73	0,12	0,14
Челмужская губа	9	145	6,6	93	3,4	11,3	0,005	0,30	5,5	0,30	0,12	0,19
Великая губа	10	265	7,0	92	5,1	17,2	0,004	0,36	4,5	0,33	0,16	0,19
Лижемская губа	46	458	7,4	93	4,7	18,5	0,009	0,36	5,4	1,42	0,11	0,19
Уницкая губа	27	502	6,7	93	4,2	16,4	0,003	0,18	5,8	1,44	0,10	0,17
Петрозаводская губа	20	303	6,7	90	4,7	14,8	0,031	0,28	5,1	0,96	0,16	0,21
Кондопожская губа												
1 км от ЦБК	15	–40	6,5	95	17,3	48,1	0,166	0,85	2,8	0,41	0,13	0,19
4 км от ЦБК	30	82	6,6	94	15,7	35,1	0,179	1,01	3,3	0,33	0,18	0,27
16 км от ЦБК	80	613	6,6	95	6,8	23,2	0,003	0,26	6,2	1,21	0,32	0,31
26 км от ЦБК	34	406	6,8	93	5,6	19,9	0,062	0,33	5,7	0,91	0,15	0,22

отложений зоны II формируется главным образом за счет седиментации мелкодисперсных взвесей сточных вод, прошедших биологическую очистку и обогащенных N, P и S. В этом районе в поверхностном 5 см слое донных отложений отмечены высокие концентрации $N_{\text{орг}}$ (до 1 %), $P_{\text{общ}}$ (до 0,3 %), $S_{\text{общ}}$ (до 0,7 %), Fe (до 7 %) и Mn (до 4 %), растительных пигментов (до $500 \text{ мкг} \cdot \text{г}^{-1}$). В илах центрального глубоководного района Кондопожской губы (зона III) вследствие непрерывного накопления в них веществ автохтонного происхождения и трансформированных техногенных взвесей в настоящее время увеличиваются концентрации C, P и Fe [Васильева, 1986, 1990; Белкина, 2005].

Поверхностные взвеси в других районах Онежского озера имеют окисленный характер, большая часть фосфора находится в минеральной форме (>60 %) (табл. 4). Состав взвесей центральных глубоководных районов отличается более высоким содержанием азота органического. Для донных отложений Онежского озера в отличие от малых водоемов в целом характерно то, что наиболее интенсивно процессы разложения ОВ протекают в присутствии кислорода в зоне контакта осадка с надилловой водой. Коэффициент удержания C, N, P в поверхностном «живом» слое донных отложений составляет ~0,5. Так, для донных отложений Петрозаводской губы содержание ОВ и $N_{\text{орг}}$ в поверхностной взвеси центрального района (глубина 27 м) превышало его содержание в слое донных отложений 0–1 см в 2 раза, а фосфора – в 1,5. В то же время для техногенных накоплений Кондопожской губы, где процесс разложения ОВ в основном происходит в анаэробных условиях, коэффициент удержания достигал значения 0,5 только на глубине осадка 40 см (рис. 2).

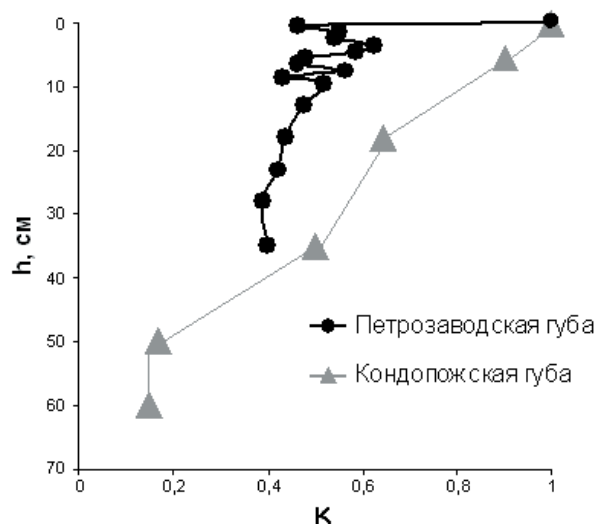


Рис. 2. Изменение коэффициента удержания ОВ с глубиной в донных отложениях Петрозаводской губы и Кондопожской губы

Процессы преобразования ОВ донных отложений требуют кислорода, источником которого являются придонные воды. Глубина проникновения растворенного кислорода в донные отложения зависит от ряда противоположно действующих факторов, среди которых наиболее существенными являются: концентрация кислорода в придонном слое воды, гранулометрический и химический состав осадков, температура, скорость осадконакопления, гидрофизические условия придонного слоя воды, численность и активность бактерий и донных беспозвоночных [Мизандронцев, 1990]. Например, для открытой части Ладожского озера мощность окисленного слоя (h_{oxic}) лежит в диапазоне от 1,5 до 4 см и увеличивается с глубиной для деклинальной и профундальной зоны и уменьшается – для ультрапрофундальной. Мощность h_{oxic} отложений в зоне развития сильных течений изменяется от 0,1 до 5 см. Мощность окисленного слоя илов, накапливающихся во впадинах залива Большое Онего (глубина залегания 100 м), варьировала от 1 до 9 см. Для района Петрозаводского Онего, обладающего ровным рельефом, слой грубозернистых осадков мощностью 3–5 см, покрывающий ледниковые и послеледниковые глины, является окисленным. В Центральном Онего, где накапливаются илистые осадки, $h_{\text{oxic}} = 5–16$ см. Причиной такого разброса, возможно, являются как морфометрические особенности дна исследуемых районов озер и динамическая активность их водных масс, так и размер частиц (чем крупнее частицы осадка, тем легче и глубже проникает в него кислород). В зонах максимальных скоростей осадконакопления (как правило, это прибрежные районы, испытывающие антропогенное воздействие) h_{oxic} минимальна. Например, в районе городов Питкяранты и Сортавалы (Ладожское озеро) в июне величина h_{oxic} составляла 0,5 см и 0,1 см, соответственно. В местах наибольшего загрязнения, где отмечается появление локальных анаэробных зон, h_{oxic} , по-видимому, меняется по сезонам года. Отсутствие окисленного слоя было обнаружено в Кондопожской губе (Онежское озеро) на площади дна 5 км^2 в районе выпуска сточных вод ЦБК. По мере удаления от комбината h_{oxic} увеличивалась [Белкина, 2005; Белкина и др., 2006].

Величина h_{oxic} также зависит от скорости аэробной деструкции ОВ. Максимальные значения суточного ПК в поверхностном слое донных отложений получены в северной части Ладожского озера в Сортавальском ($1,85 \text{ г } O_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) и Питкярантском ($0,9 \text{ г } O_2 \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) заливах, а также на глубоководных станциях открытой части (до

2,24 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Среднее значение ПК для пелагиальных станций в 2 раза меньше, чем для заливов, и составляет 0,6 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. Для Онежского озера значения ПК колеблются в пределах от 0,05 до 2,8 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, наибольшие величины получены для техногенных осадков Кондопожской губы.

Максимальные значения потоков кислорода (F) в донные отложения, оцененные расчетным методом И. Б. Мизандронцева [1990] для стационарных условий, характерны для Сортавальского (до 2,76 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) и Питкярантского (0,63 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) заливов Ладожского озера. Невысокие значения F (0,05–0,06 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) получены для донных отложений, залегающих в зоне активного взаимодействия водных масс на выходе из этих заливов. Среднее значение F для станций, расположенных в пелагиали, составляет 0,08 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, тогда как величины F для центрального района озера несколько выше (0,1–0,2 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Минимальные их значения характерны для осадков гидродинамически активных зон озера (не больше 0,05 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Скорости деструкции ОВ в донных отложениях Ладожского озера имеют более высокие величины для заливов по сравнению со станциями пелагиали (табл. 5).

Таблица 5. Потребление кислорода илом (ПК), поток кислорода в донные отложения (F) и скорости деструкции органических веществ в донных отложениях северной части Ладожского озера (ДОВ₁ – рассчитанные из опытов ПК; ДОВ₂ – по величине F)

Район, глубина залегания	С : N	ПК	F	ДОВ ₁	ДОВ ₂
		г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$	г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$	г $C \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$	г $C \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$
Центральный район					
N = 100 м	6,3	0,14	0,10	0,04	0,03
N = 114 м	12,1	0,21	0,21	0,06	0,06
Глубоководная часть					
Северной Ладоги					
N = 115 м	8,5	0,86	0,08	0,24	0,02
N = 77 м	7,9	2,24	0,08	0,63	0,02
Питкярантский залив					
N = 24 м	10,7	0,93	0,63	0,26	0,18
Выход из					
Питкярантского					
залива					
N = 66 м	7,0	0,1	0,06	0,03	0,02
N = 70 м	5,5	0,8	0,08	0,22	0,02
Сортавальский залив					
N = 20 м	5,6	1,85	1,44	0,52	0,40
N = 19 м	5,9	1,41	2,76	0,40	0,77

Для Онежского озера, так же как и для Ладожского, наибольшие значения F получены для осадков, подвергающихся интенсивному антропогенному воздействию. В вершинной части Кондопожской губы значения F достигают 2,81 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. По мере удаления от комбината они уменьшаются и на выходе из губы близки к значениям для осадков откры-

того озера (для глубоководных станций залива Большое Онего – 0,12 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$). Для сравнения укажем, что в олиготрофном оз. Севан (до снижения его уровня) поглощение кислорода илами составляло 0,013–0,13 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ [Гамбарян, 1962], в центральной части оз. Эри в летние месяцы оно было равно 0,4–2,4 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ [Lucas, Thomas, 1971]. В работе F. R. Hayes, N. A. Mac Aulay [1959] приведены данные поглощения кислорода илами различных озер, составляющие 0,15–1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, в работах А. Н. Дзюбана [2010] – от 0 до 0,94 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. Как уже указывалось, потребление кислорода илами, полученное «скляночным» методом, для эвтрофных озер Вохтозеро и Пелдожское (2,0 и 2,3 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$) выше, чем для мезотрофных озер Укшезеро и Шотозеро (0,8 и 0,4 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$, соответственно). Опыты по потреблению кислорода донными отложениями эвтрофного оз. Пряжинского при экспозиции осадков под слоем аэрированной воды дали значение 1,5 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$.

Высокие значения потребления кислорода илом, как правило, соответствуют высоким значениям скорости минерализации ОВ и более высоким значениям потоков биогенных веществ из донных отложений. Так, скорости трансформации ОВ и поступление биогенных элементов из донных отложений в воду для эвтрофных озер были в 2–10 раз выше, чем для мезотрофных (табл. 5). Поступление биогенных элементов из донных отложений крупного олиготрофного озера, каким является Онежское, на порядок меньше, чем потоки, полученные для малых мезотрофных озер. Так, для илов центральных районов озера поступление азота изменялось от 0,05 до 0,3, а фосфора – от 0,02–0,08 мг $\cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$. В районах, подверженных загрязнению, – Кондопожской и Петрозаводской губах – потоки были значительно больше (N – от 0,7 до 5, P – от 0,1 до 3 мг $\cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$).

Выводы

Накопление ОВ и азота органического в донных отложениях озер Карелии соответствует их трофическому статусу и закономерно увеличивается от олиготрофного к эвтрофному водоемам. Максимальное содержание ОВ обнаружено в высокогумусных водоемах с гидрокарбонатным классом вод группы кальция, минимальное – в мезогумусных слабощелочных слабокислых озерах с гидрокарбонатным классом вод группы кальция и натрия. В распределении фосфора в озерах разной трофии не наблюдается отличий.

Интенсивность обменных процессов на границе раздела вода – дно увеличивается с ростом трофического уровня водоема.

Основной процесс минерализации органического вещества в донных отложениях олиготрофного водоема происходит на границе вода – дно, для мезотрофного водоема – в поверхностном, окисленном слое донных отложений. Основная доля органического вещества в эвтрофном водоеме разлагается в анаэробных условиях.

Донные отложения оказывают значительное влияние на кислородный режим водоема. Поглощение кислорода донными отложениями зависит от трофического статуса водоема и колеблется от 0,01 до 0,1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ для олиготрофных, от 0,1 до 1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ для мезотрофных и более 1 г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сут^{-1}$ для эвтрофных озер. Поглощение кислорода донными отложениями Кондопожской губы Онежского озера и Сортавальского залива Ладожского озера, подверженных антропогенному воздействию, соответствует уровню эвтрофного водоема.

Литература

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

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

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.

Васильева Е. П. Особенности формирования химического состава осадков Кондопожской губы // Лимнология Кондопожской губы Онежского озера. Петрозаводск, 1986. С. 36–47.

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

Гамбарян М. Е. К методике определения интенсивности деструкции органических веществ в донных отложениях глубоководных водоемов // Микробиология. 1962. Т. 31, вып. 5. С. 895–898.

Дривер Дж. Геохимия природных вод. М.: Мир, 1985. 439 с.

Дзюбан А. Н. Деструкция органического вещества и цикл метана в донных отложениях внутренних водоемов. Ярославль: Принтхаус, 2010. 192 с.

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

Мизандронцев И. Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.

Семенов А. Н. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 540 с.

Семенович Н. И. Донные отложения Онежского озера. Л.: Наука, 1973. 102 с.

Håkanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 316 p.

Hayes F. R., Mac Aulay N. A. Lake water and sediment. Oxygen consumed in water over sediment cores // Limnol. and Oceanogr. 1959. Vol. 4, N 3. P. 291–298.

Lucas A. M., Thomas N. A. Sediment oxygen demand in lake Erie's central basin // Proceedings of 14th Conference Great Lakes Research 1970. Toronto, 1971. P. 781–787.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Белкина Наталья Александровна

старший научный сотрудник, к. х. н.
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

Belkina, Natalia

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