

## ИЗМЕНЕНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ОЗЕРНЫХ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ (НА ПРИМЕРЕ ЛАДОЖСКОГО И ОНЕЖСКОГО ОЗЕР)\*

*По комплексу показателей, характеризующих окислитель (кислород, железо, марганец), восстановитель (органическое вещество) и среду (рН, Eh, влажность, пористость, удельная масса), дана характеристика окислительно-восстановительного состояния поверхностного слоя донных отложений Ладожского и Онежского озер. На основе сравнительного анализа изучено изменение этих характеристик под действием антропогенных факторов. Показано, что следствием антропогенного влияния на донные отложения являются визуальные изменения донных отложений, изменения физических и физико-химических характеристик, изменение химического состава донных отложений, а также нарушение естественного хода этих показателей по вертикали осадка. В условиях многофакторного воздействия окислительно-восстановительное состояние донных отложений может быть одним из критериев экологической оценки состояния экосистемы большого водоема.*

**Ключевые слова:**

*антропогенное воздействие, донные отложения, окислительно-восстановительные процессы.*

Ладожское и Онежское озера являются крупнейшими пресноводными резервуарами Европы, ухудшение качества воды в которых может привести к проблемам с обеспечением питьевой водой всего Северо-Западного региона РФ. Водоемы входят в водосборный бассейн р. Невы, являющейся безальтернативным источником водоснабжения г. Санкт-Петербурга, и во многом определяющей качество воды Финского залива и Балтийского моря. Охрана водных ресурсов Онежского и Ладожского озер объявлена СБ РФ стратегической задачей, в Госдуме РФ готовится законопроект об их защите. Озера используются для судоходства, служат источниками питьевого, коммунально-бытового, промышленного водоснабжения и приемниками сточных вод, имеют большое рыбохозяйственное и бытовое значение, выполняют рекреационную функцию. Водосбор Ладожского озера характеризуется высоким уровнем экономического развития с концентрацией производства выше общероссийского. Основными проблемами озер являются эвтрофирование и загрязнение. Именно поэтому, исследование реакции водной экосистемы на антропогенное воздействие является важной научной задачей.

Донные отложения (ДО) Онежского и Ладожского озер изучаются не один десяток лет. Характеристика осадков этих озер (гранулометрический и химический состав, стратиграфия и текстура грунтовых моно-

литов, результаты палеогеографических исследований) представлены в работах [1–13; 15; 18–20]. Несмотря на обилие имеющихся материалов, вопросу окислительно-восстановительного состояния ДО должного внимания не уделялось, хотя именно окислительно-восстановительная обстановка определяет формы существования элементов и их подвижность, интенсивность деструкции и минерализации органического вещества (ОВ) и других биохимических превращений, влияет на численность и активность бентосных организмов.

ДО исследуемых озер являются минеральными осадками, процессы формирования которых, в подавляющем большинстве случаев, происходят в окислительной среде, что определяет поступление в ДО в основном окисленных форм элементов. Интенсивность процессов минерализации в свежееобразованном осадке определяется степенью его разложения и метаморфизации в ходе седиментации через водную толщу, а также соотношением органического вещества и окисленных форм элементов. ОВ разного генезиса, отличающееся по количественному и качественному составу, выступая в роли восстановителя, также по-разному влияет на процессы диагенетического преобразования осадка.

Цель данной работы заключается в установлении закономерностей изменения окислительно-восстановительного состояния ДО при антропогенном воздействии на основе

\* Работа поддержана проектом РНФ 14-17-00766.

сравнительного анализа физических, химических и физико-химических показателей, которые характеризуют окислитель (кислород, железо, марганец), восстановитель (ОВ) и среду, в которой происходят окислительно-восстановительные процессы.

### Объекты и методы исследования

Онежское и Ладожское озера – это уникальные, глубоководные, холодноводные озера Европы (площадь зеркала – 9720 км<sup>2</sup> и 17680 км<sup>2</sup>, объем водной массы – 295 км<sup>3</sup> и 908 км<sup>3</sup>, соответственно), расположенные в зоне сочленения древнего Балтийского кристаллического щита и Русской платформы. Центральные глубоководные области дна озер покрыты глинистыми илами, южные районы до глубин 40 м – песками, которые сменяются крупноалевритовыми илами, последние мелкими алевритами. В заливах (Кондопожская и Петрозаводская губы – Онежское озеро; районы городов Сортавала и Питкяранта, п. Ляскеля – Ладожское озеро) встречаются ДО техногенного происхождения, основными признаками которых являются: отсутствие коричневого наплава и темные, грязно-серые, иногда черные тона студенистых осадков, залегающих над серым плотным илом, присутствуют кора и другие остатки производств, что позволяет достаточно точно визуальную мощность загрязненных осадков [2, с. 689].

Исследования окислительно-восстановительного состояния ДО проводилось на 39 станциях в Онежском озере и на 21 станции в северной части Ладожского озера, расположенных как в заливах, подверженных интенсивному антропогенному воздействию, так и в глубоководных районах озер (рис. 1, 2). По химическим показателям северная открытая часть Ладожского озера (минерализация 63 мг·л<sup>-1</sup>) сопоставима с олиго-мезотрофными экосистемами, а район Сортавальских шхер – с эвтрофными. Большая часть водных масс Онежского озера (минерализация 37 мг·л<sup>-1</sup>) сохранила олиготрофный характер, трофический статус Кондопожской губы характеризуется как мезотрофный.

Отбор проб поверхностного 0–15 см слоя донных отложений (1997–2001 гг.) осуществлялся стратометром «Limnos» и поршневой трубкой. Для исследования вертикального распределения химических характеристик монолит делился на шесть слоев по длине колонки: 0–1 см, 1–2 см, 2–3 см, 3–5 см, 5–10 см, 10–15 см. В пробах ДО измерялись величины *pH* и *Eh* (Pt электрод, медиатор ЭДТА или ОЭДФК), толщина окисленного слоя оценивалась визуаль-

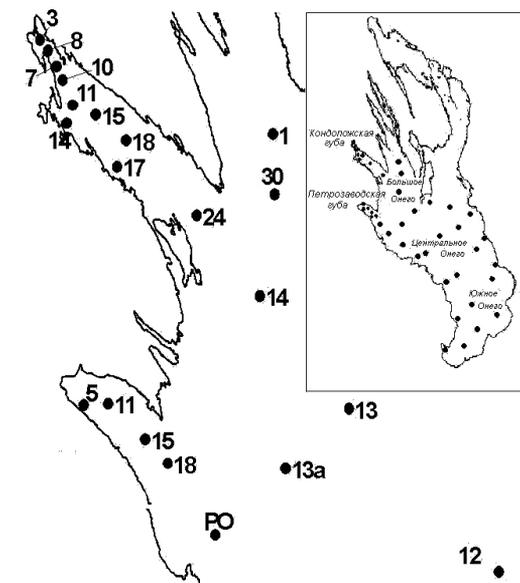


Рис. 1. Схема расположения станций наблюдения на Онежском озере.



Рис. 2. Схема расположения станций наблюдения на Ладожском озере.

но, определялись естественная влажность (*W*), пористость (*p*), удельная масса (*m<sub>i</sub>*), потери при прокаливании (**п.п.п.**), суточное потребление кислорода (**ПК**), органический углерод (*C<sub>орг</sub>*), фосфор общий (*P*), азот органический (*N*), *Fe*, *Mn*, [21, с. 18].

### Результаты и обсуждение

ДО являются сложной коллоидно-дисперсной системой. Физические характеристики этой среды (*W*, *p*, *m<sub>i</sub>*) зависят от скорости седиментации, качественного

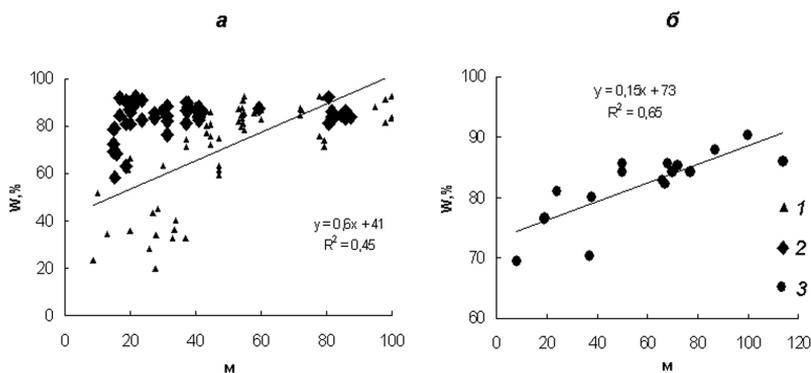


Рис. 3. Зависимость естественной влажности ДО от глубины водоема: а (1) – Онежское озеро; б (2) – Кондопожская губа Онежского озера; б (3) – Ладожское озеро.

характера отложений, степени уплотнения, активности бентосных организмов и т.д. Для северной части Ладожского озера величина  $W$  верхнего 5-см слоя осадков изменяется от 69% (глубина залегания 8 м) до 86% (глубина 114 м), для Онежского озера – с 23% (глубина 9 м) до 92% (глубина 100 м) (здесь и далее все расчеты выполнены на воздушно-сухой вес осадка). Нарушение естественной закономерности увеличения  $W$  поверхностного слоя с глубиной водоема наблюдается в Кондопожской губе Онежского озера, куда поступают сточные воды целлюлозно-бумажного производства (рис. 3). По колонке ДО величины  $W$  и  $p$  уменьшаются, особенно резко их значения меняются в поверхностном 5 см слое. Для слоя ДО мощностью 15 см в Онежском озере  $W$  уменьшается на 8–16%, а  $p$  на 0,08, в Ладожском озере – на 1–25% ( $W$ ), и 0,01–0,17 ( $p$ ). Ве-

Таблица 1

**Изменение естественной влажности ( $W, \%$ ), пористости ( $p$ ) и удельной массы ( $m_i, \text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) высушенного при  $105^\circ\text{C}$  осадка, донных отложений северной части Ладожского озера по глубине залегания ( $h, \text{см}$ )\***

$h$ (см)	$W$	$m_i$	$p$
0–1	<u>75,80–93,68</u> 83,87	<u>0,07–0,27</u> 0,12	<u>0,88–0,94</u> 0,91
1–2	<u>68,20–90,12</u> 83,22	<u>0,10–0,39</u> 0,19	<u>0,82–0,90</u> 0,86
2–3	<u>65,20–88,43</u> 79,40	<u>0,12–0,43</u> 0,23	<u>0,77–0,89</u> 0,82
3–5	<u>59,90–83,91</u> 76,16	<u>0,17–0,51</u> 0,28	<u>0,71–0,85</u> 0,78
5–10	<u>47,10–79,80</u> 71,10	<u>0,22–0,69</u> 0,34	<u>0,50–0,78</u> 0,73
10–15	<u>61,80–77,62</u> 70,62	<u>0,26–0,49</u> 0,34	<u>0,66–0,78</u> 0,72

\* Над чертой – пределы колебаний, под чертой – среднее значение.

личина удельной массы ( $m_i$ ) вследствие уплотнения возрастает в среднем на  $0,22 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  (табл. 1). Наибольшие изменения  $W$ ,  $p$ ,  $m_i$  отмечены в тех случаях, когда с глубиной изменяется гранулометрическая характеристика осадка. Нарушение естественного хода  $W$ ,  $p$ ,  $m_i$  по вертикали в осадке вследствие его уплотнения

отмечено в Ладожском озере на ст. **R, H, Q**, что связано для ст. **R** с **неравномерным поступлением взвесей, приносимых с речным стоком и с урбанизированных берегов**, для ст. **H и Q** – с **диагенетическими преобразованиями в осадке** (подповерхностный минимум  $W$  совпадает с формирующейся рудной прослойкой, обогащенной Mn).

Важными физико-химическими характеристиками среды являются  $pH$  и  $Eh$ . Геохимические процессы в водах исследуемых озер ограничены сравнительно узкими пределами кислотно-основных равновесий, благодаря буферной емкости карбонатной системы, регулирующей  $pH$  в пределах 6,8–8,4. Пробы придонной воды характеризуются значениями  $pH$  в диапазоне от 6,97 до 7,51 для Ладожского озера и от 6,77 до 7,60 для Онежского озера. Значения  $pH$  надилловой воды (5 см от дна) несколько ниже, чем придонной (1 м от дна), и изменяются от 6,88 до 7,46 (Ладожское) и от 6,66 до 7,31 (Онежское).

Величины  $pH$  поверхностного окисленного слоя ДО Ладожского и Онежского озер в целом закономерно уменьшаются от периферии к центральным глубоководным районам (от 6,68 до 5,42 и от 6,95 до 5,76, соответственно), вследствие более высоких концентраций  $\text{CO}_2$ , образовавшегося в результате деструкции и минерализации ОВ (например, для Ладожского озера повышенное содержание углекислого газа в надилловой воде по сравнению с придонным горизонтом наблюдалось повсеместно, например, содержание  $\text{CO}_2$  на ст. **N** –  $2,97 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  – придонная вода и  $3,74 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$  – надилловая вода, ст. **O** – 3,19 и 4,29, ст. **P** – 3,41 и 4,40, ст. **Q** – 3,19 и 4,07  $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$ , соответственно). Нарушение указанной выше закономерности наблюдалось в Кондопожской губе Онежского озера и в Питкярантском заливе Ладожского озера,

где по мере удаления от выпуска сточных вод ЦБП  $pH$  ДО увеличивался (для Кондопожской губы с 5,5 до 7,2).

Вертикальный профиль  $pH$  в ДО, как правило, проходит через минимум в окисленном слое осадка, вследствие интенсивных биохимических процессов и гидролиза соединений  $Fe^{2+}$ , поступающего из поровых растворов более глубоких слоев. При переходе от поверхностного окисленного осадка к более глубокому восстановленному значения  $pH$  заметно возрастают, проходя через максимум в переходной зоне (рис. 4). Так, для Ладожского озера на ст. G  $pH$  изменяется с 5,82 (слой 2–3 см) до 6,93 (слой 3–5 см) ( $\Delta = 1,11$ ), на ст. P с 6,51 (слой 3–5 см) до 7,44 (слой 5–10 см) ( $\Delta = 0,93$ ), на ст. K с 6,37 (слой 2–3 см) до 7,17 (слой 3–5 см) ( $\Delta = 0,8$ ). Изменение величины  $pH$  при переходе через границу редокс-зон для станций деклинальной и профундальной зон глубоководного района (С, D, O, P, E, F, 4, G) выражено достаточно резко: от 0,19 до 1,11, среднее значение  $\Delta pH = 0,6$ . Для станций ультропрофундальной зоны (K, M, Q) среднее значение  $\Delta pH$  равно 0,18. Глубже в восстановленном осадке как правило происходит некоторое снижение величины  $pH$ . Диапазон изменений  $pH$  для восстановленных слоев осадка равен 6,24–7,44. Отсутствие окисленного слоя донных отложений антропогенных зон является причиной того, что значения  $pH$  возрастают с глубиной (ст. R, N) (рис. 4).

Значения  $Eh$  придонных и надилловых вод Ладожского и Онежского озер лежат в интервале от 300 до 400 мВ, что соответствует нормально аэрированным водам. Значения  $Eh$  поверхностного окисленного слоя ДО несколько ниже  $Eh$  воды и находятся в пределе от +222 до +402 мВ для Ладожского и от +201 до +510 мВ для Онежского озер. Максимальные значения

$Eh$  наблюдались на станциях центральных районов, величины  $Eh$  для осадков, залегающих в гидродинамически активных районах, меньше на 100–200 мВ. Минимальные значения потенциала соответствуют осадкам в зонах антропогенного воздействия. При переходе от поверхностного окисленного ДО к восстановленному слою, как правило, происходит падение величины  $Eh$  на 100–400 мВ. В восстановленных слоях ДО значения  $Eh$  изменяются от -57 до +200 мВ (Ладожское) и от -83 до +213 мВ (Онежское). Минимальные значения  $Eh$  по вертикали керна (им, как правило, соответствуют наиболее высокие значения  $pH$ ), отмечены в слое осадка, расположенном непосредственно под верхним окисленным слоем. Мортимер [24, с. 147] объясняет это явление максимальной активностью анаэробных процессов разложения ОВ непосредственно под верхним окисленным слоем ДО и затуханием их в более глубоких слоях осадка. Наличие минимума  $Eh$  на определенной глубине в колонке озерных ДО фиксировалось и другими исследователями [4, с. 112; 15, с. 148; 16, с. 180; 18]. На рис. 5 представлены примеры профилей  $Eh$  в ДО Ладожского озера, профили первого типа отражают нормальное течение процессов раннего диагенеза в хорошо аэрированном водоеме (ДО глубоководных районов). Профиль второго типа, где  $Eh$  почти не изменяется по колонке наблюдается в ДО заливов, подверженных антропогенному влиянию. В зонах развития течений (ст. А, В, D, F), где осадки способны к переносу и переотложению, встречаются профили третьего типа, где значение  $Eh$  поверхностного слоя ДО на 50–240 мВ ниже, чем значение  $Eh$  подстилающих глин на глубине 10 см (рис. 6).

Таким образом, вертикальное распределение  $Eh$  является хорошим качественным показателем, отражающим степень

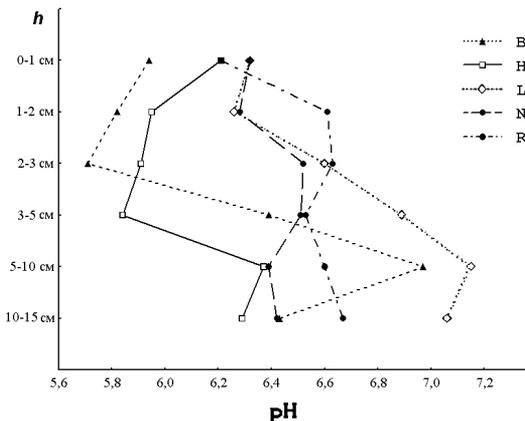


Рис. 4. Изменение  $pH$  ДО Ладожского озера по глубине залегания осадка.

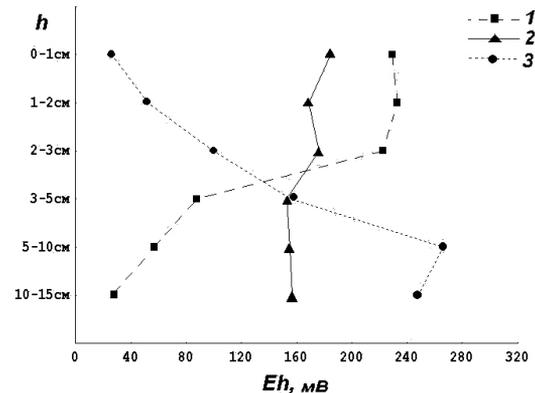


Рис. 5. Изменение окислительно-восстановительного потенциала ДО Ладожского озера по глубине осадка. 1 — ст. В, 2 — ст. L, 3 — ст. N.

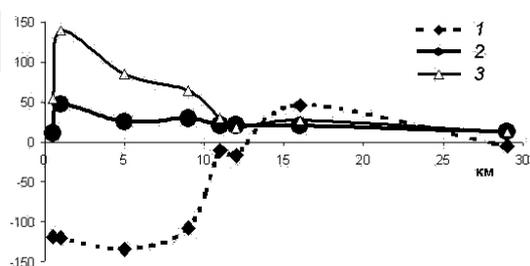


Рис. 6. Изменение окислительно-восстановительного потенциала (1 –  $Eh$ , мВ, представлены значения относительно хлор-серебряного электрода); п.п.п. (2 – %); весового отношения  $C:P$  (3) в ДО Кондопожской губы Онежского озера по мере удаления от ЦБК.

антропогенного воздействия на ДО. Пространственное распределение  $Eh$  поверхностного слоя ДО может определять границы экологически опасной зоны, подверженной интенсивному влиянию сточных вод. Например, Кондопожская губа, где  $Eh$  ДО, загрязненных отходами ЦБК, на 100–200 мВ ниже, чем  $Eh$  центрального района губы и на 300–500 мВ ниже, чем  $Eh$  ДО открытого озера (рис. 6).

Ведущим процессом в ДО на стадии раннего диагенеза является процесс разложения ОВ, которое выступает в роли восстановителя. Особенностью ОВ ДО исследуемых озер является неравномерность его пространственного распределения, которая обусловлена размерами водоемов, глубиной и рельефом дна, биологической продуктивностью и разной степенью минерализации ОВ до его захоронения в ДО, степенью антропогенного влияния и т.д. В глубоководной части центральных районов содержание ОВ в ДО возрастает с глубиной залегания. Так, максимальные значения концентрации  $C_{орп}$  и величин п.п.п. в ДО Ладожского озера обнаружены в глубоководном районе, расположенном восточнее о. Валаам (ст. М, глубина 114 м, 6,15 и 23,43%, соответственно), минимальное – севернее о. Валаам в зоне активного развития течений (ст. Ф, глубина 37 м, 2,85%  $C_{орп}$  и 13,84% п.п.п.). Для открытой части Онежского озера, наиболее высокое содержание ОВ в иловых ДО определено в Большом Онеге (глубина 100 м, 5,2%  $C_{орп}$  и 19,5% п.п.п.), минимальное в глинистых илах Центрального Онега (глубина 30 м, 0,4%  $C_{орп}$  и 3% п.п.п.). Нарушение этой закономерности наблюдалось в заливах, подверженных воздействию сточных вод ЦБК. В Ладожском озере – это Питкярантский залив: максимальная концентрация ОВ содержится в техногенных осадках в районе сброса сточных вод на ст. N (глуби-

на 24 м,  $C_{орп}$  4,25%, п.п.п. 14,85%), далее по мере удаления от комбината содержание ОВ уменьшается (ст. О, глубина 66 м –  $C_{орп}$  3,1%, п.п.п. 14,37% и ст. P, глубина 70 м –  $C_{орп}$  2,47%, п.п.п. 11,79%). Атомные соотношения  $C:N$  и  $C:P$  для ДО глубоководной части Ладожского озера изменяется в пределах:  $C:N$  от 6 до 14 (среднее 8.7) и  $C:P$  с 20 до 150 (среднее 80). Для ДО динамической зоны:  $C:N$  – от 6.5 до 40 (среднее 12.9),  $C:P$  – от 20 до 100 (среднее 80). Максимальные значения зафиксированы в ДО в прибрежной зоне г. Питкяранта и п. Ляскеля ( $C:N$  до 60,  $C:P$  до 200). По колонке ДО содержание ОВ как правило, уменьшается. Нарушение вертикальной стратификации ОВ наблюдали как в заливах (ст. H, R, N), так и в открытом районе (ст. А, О, F – максимум в восстановительной зоне, ст. M, L – минимум в окисленном слое), что указывает на изменение седиментационного режима водоема в результате хозяйственной деятельности. Аналогичные изменения в процессах формирования ОВ ДО отмечены и в Онежском озере, особенно в Кондопожской губе, где в результате длительного поступления сточных вод «АО Кондопога» в районе комбината в ДО накопилось около 200000 т ОВ. Техногенные ДО, содержащие высокие концентрации токсических веществ и биогенных элементов, оказывают влияние на химический состав вод, усиливая процессы эвтрофирования [1, с. 181; 2, с. 689; 5, с. 174].

Особенностью трансформации ОВ в ДО Онежского и Ладожского озер является доминирование процессов, связанных с потреблением кислорода в окислительных и редокс-реакций железа и марганца в восстановительных условиях. В статье [3, с. 35] было показано, что глубина проникновения кислорода ( $h_{oxic}$ ) в ДО открытых районов озер варьировала от 1 до 9 см, увеличиваясь с глубиной для деклинальной и профундальной зоны, и уменьшаясь для ультрапрофундальной зоны. В районах, испытывающих антропогенное воздействие,  $h_{oxic}$  не превышала нескольких миллиметров. Например, в районе городов Питкяранта и Сортавала (Ладожское озеро) в июне месяце величина  $h_{oxic}$  составляла 0,5 см и 0,1 см соответственно, а в местах наибольшего загрязнения, где отмечается появление локальных анаэробных зон,  $h_{oxic}$ , по-видимому, имеет сезонный ход (ст. H, N, 9). Отсутствие окисленного слоя на площади дна в 5 км<sup>2</sup> было обнаружено на Кондопожской губе (Онежское озеро) в районе выпуска сточных вод ЦБК, по мере удаления от комбината  $h_{oxic}$  увеличивалась

[2, с. 689]. **ПК** и скорость деструкции **ОВ** (Ладожское: от 0,1 до 2,2 г  $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$ , Онежское: от 0,05 до 2,8 г  $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$ ) охватывает почти весь диапазон значений, характерных для пресноводных водоемов, различающихся по уровню трофии [22, с. 291] (табл. 2). Например, в ДО оз. Эри значения **ПК** изменяются от 0,4 до 2,4 г  $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$  [23, с. 781], в оз. Севан – от 0,013 до 0,13 г  $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$  [3, с. 35], в водохранилищах р. Волги – от 0 до 0,94 г  $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$  [14]. В Сортавальском заливе и Кондопожской губе значения **ПК** соответствуют осадкам, типичным для эвтрофных водоемов, в глубоководной части озер – для олиготрофных.

Таблица 2

**Скорости деструкции органических веществ в донных отложениях северной части Ладожского озера: 1 – рассчитанные из опытов по потреблению кислорода илом; 2 – рассчитанные по величине окисленного слоя осадка (метод Мизандронцева [17, с. 43])**

№ станции	C:N	1		2	
		Потребление кислорода илом г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$ ПК	Деструкция <b>ОВ</b> г $C \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$	Поток кислорода г $O_2 \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$ F	Деструкция <b>ОВ</b> г $C \cdot m^{-2} \cdot сутки^{-1}$
L	6,3	0,14	0,04	0,1	0,03
M	12,1	0,21	0,06	0,21	0,06
N	10,7	0,93	0,26	0,63	0,18
O	7,0	0,1	0,03	0,06	0,02
P	5,5	0,8	0,22	0,08	0,02
Q	8,5	0,86	0,24	0,08	0,02
4	7,9	2,24	0,63	0,08	0,02
R	5,6	1,85	0,52	1,44	0,40
11	5,9	1,41	0,40	2,76	0,77

\* Скорость аэробной деструкции органических веществ в поверхностном слое донных отложений оценивалась по суммарному уравнению распада **ОВ** в кислородных условиях (на 106 атомов C требуется 138 молекул  $O_2$ ).

Химический состав ДО Онежского и Ладожского озер отличается высоким содержанием железа и марганца. Хозяйственная деятельность на водосборе озер (сведение лесов, земледелие, мелиорация, закисление почв и т.д.) привела к более интенсивному выносу этих элементов в водотоки и седиментации в ДО. Например, в зонах седиментации речных взвесей р. Тохмайоки в Ладожском озере на

ст. 10 – содержание **Fe** превышает кларк в 5 раз, **Mn** – в 8 раз, а также в районах, подверженных процессам антропогенного эвтрофирования, как, например, в донных отложениях Кондопожской губы Онежского озера, где в течение десяти лет содержание железа в поверхностном слое донных отложений увеличилось в 1,5–3 раза (до 8,3%). Возможно, причиной этого процесса является не только интенсивный вынос элементов с водосборных территорий, но и их иммобилизация из более глубоких слоев ДО. В пелагиали водоемов в ДО образуются рудные прослои **Fe** и **Mn**.

## Выводы

1. Донные отложения являются уязвимым элементом экосистем Онежского и Ладожского озер, быстро и необратимо реагирующим на антропогенное воздействие.

2. Антропогенное воздействие на окислительно-восстановительное состояние ДО проявляется в изменениях физических, физико-химических и химических показателей осадка, описывающих редокс-процессы. Характер этих изменений зависит как от типа воздействия, так и от вклада антропогенного фактора в формирование донных отложений.

3. Следствием антропогенного влияния на физические характеристики ДО являются: визуальные изменения донных отложений, нарушение закономерности увеличения влажности и пористости поверхностного слоя ДО с глубиной залегания, а также нарушение естественного хода этих величин по вертикали осадка.

4. Поглощение кислорода ДО Онежского и Ладожского озер охватывает весь диапазон значений, характерных для пресноводных водоемов, различающихся по уровню трофии. Величина **ПК** и скорости деструкции **ОВ** ДО глубоководной части этих озер соответствуют олиготрофным водоемам. Значения плотности потока  $O_2$  техногенных накоплений в Кондопожской губе Онежского озера, в Питкярантском и Сортавальском заливах Ладожского озера соответствуют осадкам, типичным для эвтрофных водоемов.

5. Высокие скорости седиментации в зонах влияния сточных вод способствуют аккумуляции продуктов неполного окисления **ОВ** и созданию в ДО восстановительных условий. Основными признаками антропогенного влияния на ДО является сокращение окисленного слоя, снижение **pH** и **Eh**. Пространственное распределе-

ние *Eh* поверхностного слоя ДО может определять границы экологически опасной зоны.

6. Вертикальное распределение *Eh*, *pH*, органического вещества, железа, марганца для ДО антропогенной, динамической и центральной аккумуляционных зон водоемов различны. Отклонение от монотонности изменения содержания этих компо-

нентов проявляется в наличии локальных максимумов и минимумов на различной глубине в осадке.

7. В условиях многофакторного воздействия окислительно-восстановительное состояние донных отложений может быть одним из критериев экологической оценки состояния экосистемы большого водоема.

### Список литературы:

- [1] Белкина Н.А. Загрязнение нефтепродуктами донных отложений Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. Т. 33, – 2006, № 2. – С. 181–187.
- [2] Белкина Н.А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. Т. 32. – 2005, № 6. – С. 689–699.
- [3] 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.
- [4] Белкина Н.А., Васильева Е.П., Оценка загрязненности донных отложений северной части Ладожского озера. // Водные ресурсы. Т. 26. – 1999, № 1. – С. 112–114.
- [5] 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.
- [6] Васильева Е.П. Донные отложения // Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения. – Л.: Наука, 1990. – С. 147–175.
- [7] Васильева Е.П. Химический состав донных отложений Онежского озера. Современное состояние водных объектов республики Карелия // По результатам мониторинга 1992–1997 г.г. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1998. – С. 52–54.
- [8] Васильева Е.П., Давыдова Н.Н., Белкина Н.А. Особенности формирования донных отложений // Онежское озеро, экологические проблемы. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1999. – С. 109–145.
- [9] Давыдова Н.Н. Комплексы диатомей в донных отложениях Онежского озера // Палеолимнология Онежского озера. – Л.: Наука, 1976. – С. 130–191.
- [10] Давыдова Н.Н. Состав и условия формирования диатомовых комплексов в поверхностном слое донных отложений Ладожского озера // Растительные ресурсы Ладожского озера. – Л., 1968. – С.131–174.
- [11] Давыдова Н.Н., Субетто Д.А. Геоэкологический мониторинг Ладожского озера по палеолимнологическим данным // Ладожское озеро. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2000. – С.66–75.
- [12] Демидов И.Н. Деградация поздневалядайского оледенения в бассейне Онежского озера // Геология и полезные ископаемые Карелии. – 2005, № 8. – С. 134–142.
- [13] Демидов И.Н. О максимальной стадии развития Онежского приледникового озера, изменениях его уровня и гляциоизостатическом поднятии побережий в позднеледниковье // Геология и полезные ископаемые Карелии. – 2006, № 9. – С. 171–178.
- [14] Дзюбан А.Н. Микробиологические процессы деструкции органического вещества в донных отложениях внутренних водоемов / Автореф. дисс. ... канд. биол. н. – М., 1983. – 24 с.
- [15] Игнатъева Н.В. Роль донных отложений в круговороте фосфора в озерной экосистеме // Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее. – СПб.: Наука, 2002, – С. 148–156.
- [16] Мартынова М.В. Железо и марганец в пресноводных отложениях. Монография – М., 2014. – 215 с.
- [17] Мизандронцев И.Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 175 с.
- [18] Семенович Н.И. Донные отложения Ладожского озера. – М.–Л.: Наука, 1966. – 124 с.
- [19] Семенович Н.И. Донные отложения Онежского озера. – Л.: Наука, 1973. – 102 с.
- [20] Субетто Д.А., Игнатъева Н.В., Давыдова Н.Н., Сергеева Л.В., Крыленкова Н.А. Донные отложения и их роль в оценке эволюции Ладожского озера // Ладожское озеро, прошлое, настоящее, будущее. – СПб.: Наука, 2002. – С. 122–164.
- [21] Belkina N.A. Chemical monitoring of sediments // Analytical and sampling methods for environmental monitoring in Lake Ladoga and other large lakes in Russia. – Joensuu: Joensuu yliopistopaino. – 1999, № 3. – P. 18–21.
- [22] Hayes F.R., Mac Aulay N.A. Lake water and sediment. Oxygen consumed in water over sediment cores // Limnol. and Oceanogr. V. 4. – 1959, № 3. – P. 291–298.
- [23] Lucas A.M., Thomas N.A. Sediment oxygen demand in lake Erie's central basin // Proceedings of 14-th Conference Great Lakes Research, 1970. – Toronto, 1971. – P. 781–787.
- [24] Mortimer C.H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes // J. Ecol. – 1942, № 30(1). – P. 147–201.