

УДК 574.587+ 551.312:54(282.247.211)

ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ БЕНТОСНЫХ СООБЩЕСТВ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕ- РА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ АНТРОПОГЕН- НЫХ И ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ

КАЛИНКИНА

Наталья Михайловна

Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН” Институт водных проблем Севера, cerioda@mail.ru

БЕЛКИНА

Наталья Александровна

Федеральный исследовательский центр “Карельский научный центр РАН” Институт водных проблем Севера, bel110863@mail.ru

Ключевые слова:

антропогенное
воздействие
климатические
изменения
Онежское озеро
донные отложения
химический состав
глубоководный бентос
структура сообщества
продукция

Аннотация: Рассмотрена динамика химического состава донных отложений и состояния бентосных сообществ в различных районах Онежского озера в последние 20–25 лет. Показано, что комбинированное влияние антропогенных факторов и климатических изменений вызвало глубокую трансформацию глубоководных бентосных сообществ. Вершинные участки северо-западных заливов (Кондопожская и Петрозаводская губы), где действие антропогенных факторов проявляется максимально, отнесены к наиболее загрязненной (первой) зоне. В этих районах отмечаются структурные перестройки донных ценозов: доминирование резистентных представителей олигохет и хирономид, отсутствие реликтовых ракообразных. Илы первой зоны характеризуются наибольшим содержанием органического вещества, пониженными величинами pH и Eh, присутствием токсических агентов (в Кондопожской губе). В буферных районах северо-западных заливов, отнесенных ко второй зоне, действие антропогенного фактора ослаблено влиянием насыщенных кислородом вод, поступающих из сопредельных открытых участков озера. Донные отложения буферных зон характеризуются более глубоким окисленным слоем и максимальным развитием амфиопод. Центральные глубоководные районы Онежского озера (третья зона) в настоящее время в наименьшей степени подвержены воздействию антропогенного фактора. Илы в центральной зоне характеризуются минимальным содержанием органического вещества, наличием рудных корок (содержащих железо и марганец), что определяет невысокие показатели развития бентоса. В 1998–2016 гг. во всех изученных районах Онежского озера, отнесенных к трем зонам, произошло снижение показателей численности и биомассы бентоса, что привело к уменьшению его продукции в 2–4 раза. Выявлена достоверная связь показателей продукции с содержанием железа в илах, количество которого в последние десятилетия возросло в 2–4 раза. Высказано предположение, что причиной снижения показателей бентоса является угнетающее воздействие железа, накопление которого в илах связано с увеличением поступления этого элемента в составе гумусовых веществ с речными водами вследствие климатических изменений на водосборной территории.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Д. Б. Денисов

Получена: 13 марта 2018 года

Подписана к печати: 30 июня 2018 года

Введение

В настоящее время воздействие климатических факторов на водные экосистемы нередко превышает силу влияния точечных источников антропогенного загрязнения. В новых климатических условиях происходит сильнейшее изменение, и даже снижение, видового разнообразия водных экосистем. Особенно это характерно для северных водоемов, в которых уменьшается численность холодолюбивых форм (Филатов и др., 2012, 2014; Георгиев, Назарова, 2015; Перова, 2017). Комбинированные эффекты действия природных и антропогенных факторов определяют сложность выявления причин нарушений в водных сообществах многих озер мира.

В экосистеме Онежского озера в последние годы происходит трансформация глубоководного бентоса, которая проявляется, прежде всего, в снижении его количества (Полякова, 2015; Калинкина и др., 2016). На примере Петрозаводской губы было установлено, что в этом заливе и сопредельном с ним центральном районе озера в 1995–2015 гг. численность макрозообентоса снижалась в 6–7 раз, биомасса – в 2–4 раза по сравнению с предшествующим периодом 1980-х гг. При этом снижение показателей развития основных представителей бентоса – реликтовых ракообразных и олигохет – происходило синхронно.

До настоящего времени оставалось неизученным, насколько широко охватывают экосистему Онежского озера процессы изменений в глубоководном бентосе, наблюдаются ли они в других заливах (Кондопожской губе), а также в глубоководных районах (Большом и Центральном Онего). Оставались неизвестными причины снижения количественных показателей глубоководного бентоса. В то же время в работах Е. П. Васильевой (1990, 1998) и Н. А. Белкиной (2005, 2006, 2007, 2011, 2015а, б, 2016) указывалось на изменение химического состава илов глубоководных аккумуляционных зон Онежского озера в последние десятилетия.

В связи с этим целью настоящей работы стал анализ динамики химического состава донных отложений (ДО) и состояния бентосных сообществ Онежского озера в условиях действия антропогенных и природных факторов.

Материалы

Пробы ДО для химического анализа были отобраны в различных районах Онежского озера – наиболее загрязняемых северо-западных заливах (Петрозаводская и Кондопожская губы) и центральных глубоководных районах (Большое Онего и Центральное Онего) (рис. 1). Для анализа химического состава ДО использовали данные периодических наблюдений за 1991–2016 гг. Отбор проб ДО проводился поршневой трубкой собственной конструкции (модифицированный вариант стратометра Алекссона (Hakanson, Jansson, 1983)) и пробоотборником «Limnos», которые позволяют сохранить пограничную зону вода – дно в ненарушенном состоянии.

Пробы бентоса были отобраны в 1998–2016 гг. дночертателем Экмана – Берджа с площадью захвата 0.025 м² в соответствии со стандартными методами (Методические рекомендации..., 1984, 2005). Станции отбора проб бентоса представлены на рис. 1.

Методы

Методы химического анализа донных отложений

В донных отложениях измерялись pH и Eh (Руководство..., 2009). Во влажных образцах определялась естественная влажность, аммонийный азот (N-NH₄⁺) (Аринушкина, 1970), Fe и Mn (РД 52.24.382-95; ПНДФ 14.1:2:4.139-98), лабильный фосфор (P_{лаб}) (РД 52.24.382-2006). В образцах воздушно-сухого грунта определялись потери при прокаливании (ППП), органический углерод (C_{орг}), азот органический (N_{орг}) (Аринушкина, 1982) и фосфор общий (P_{общ}) (РД 52.24.382-95), гуминовые и фульвовые кислоты (Орлов и др., 1969).

Методы изучения бентоса

Определяли численность и биомассу бентоса (Методические рекомендации..., 1984; 2005). Вычисление продукции сообществ бентоса проводили по общепринятой схеме физиологическим методом (Методические рекомендации..., 1984) с использованием полученных ранее количественных показателей продукционного процесса в популяциях донных животных Онежского озера (Алимов и др., 1982; Полякова, 1999). Для вычисления скорости потребления кислорода

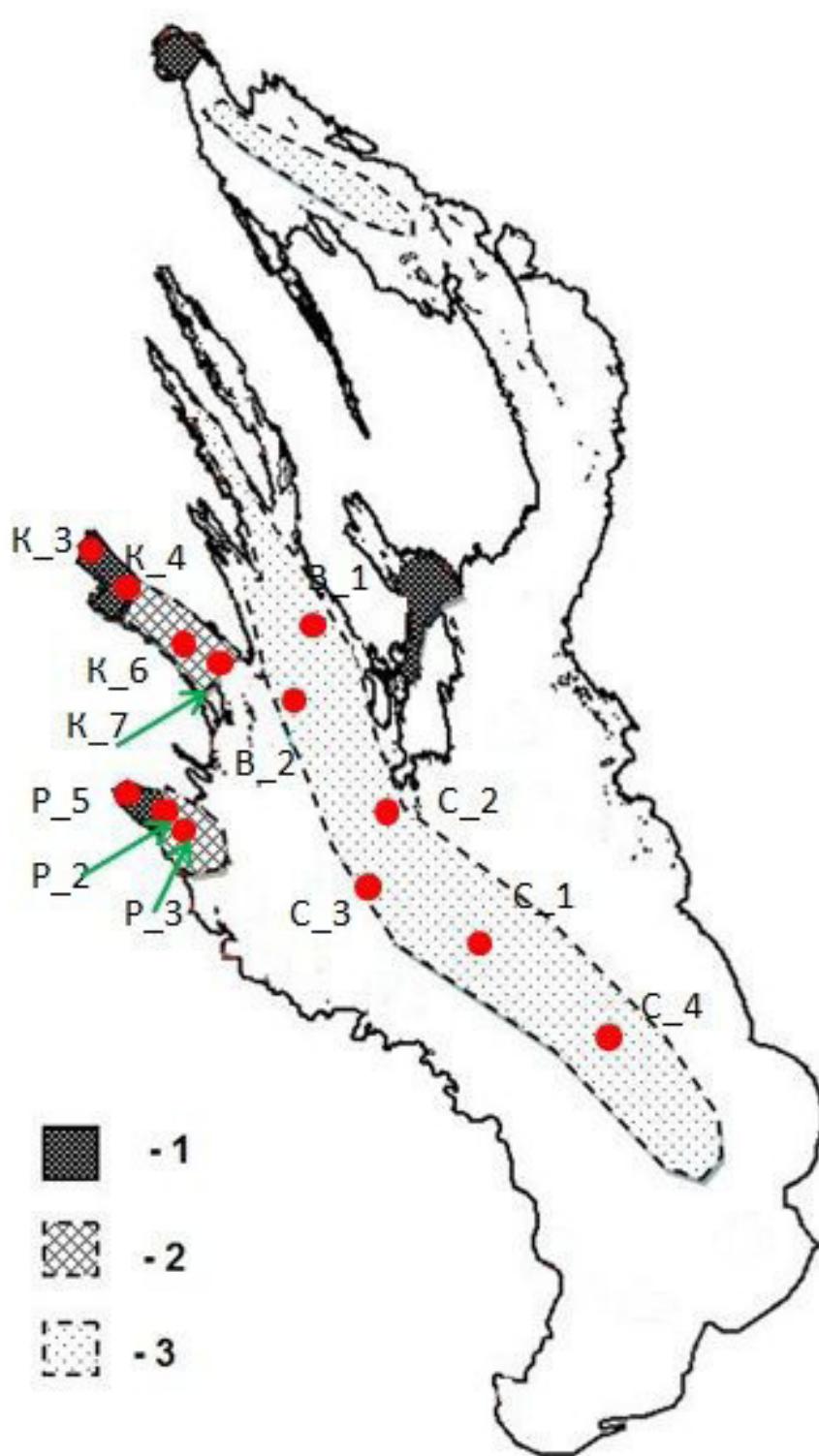


Рис. 1. Расположение станций отбора проб ДО и бентоса. 1 – зона интенсивного антропогенного воздействия; 2 – буферные зоны заливов; 3 – глубоководные участки

Fig. 1. Location of sampling stations of bottom sediments and benthos. 1 – zone of intensive anthropogenic impact; 2 – buffer zones of the bays; 3 – deep water areas

необходимые коэффициенты заимствованы из литературных источников (Заика, 1972; Сущеня, 1972, 1975; Камлюк, 1974; Алимов, 1981, 1982; Балушкина, 1987; Кухарев, Полякова, 1990; Балушкина и др., 1997).

Результаты

Кондопожская губа

Химический состав донных отложений в Кондопожской губе

На распределение и химический состав ДО Кондопожской губы значительное влияние оказывают морфометрические особенности залива и сточные воды целлюлозно-бумажного комбината (ЦБК), который сбрасывает сточные воды в залив в течение 80 лет. На протяжении последних 50 лет проводятся периодические наблюдения за антропогенным загрязнением донных отложений залива. Было показано, что в период с 1960 по 1970 г. площадь дна, загрязненная отходами ЦБК, увеличилась с 3 до 17 км² и уже к 1970 г. занимала практически всю вершинную часть губы. Техногенные осадки обладали слабой гидродинамической активностью, вследствие чего загрязнение губы носило локальный характер (Васильева, 1986). Сброс сточных вод ЦБК в Кондопожскую губу через глубинный рассеивающий выпуск после введения в строй станции биологической очистки промышленных сточных вод в начале 1980-х гг. привел к распространению мелкодисперсных органических взвесей по всей акватории губы. Влияние сточных вод хорошо прослеживается по вертикальной слоистости ДО аккумуляционных зон губы: в вершинной части осадки сложены твердыми отходами ЦБК (темные, грязно-серые, иногда черные студенистые осадки с остатками целлюлозы, бумажной пульпы и корой, залегающие над серым плотным илом). Толщина техногенного слоя колеблется от нескольких сантиметров до 5 м. Объем осадков, загрязненных отходами ЦБК, в этой части залива оценивается около 4 млн м³, что соответствует 600 тыс. т сухого вещества (Белкина, 2005). На расстоянии 10 км от ЦБК верхний 40 см слой ДО представлен слоистой четырехцветной структурой мелкодисперсного осадка светло-серого, черного, коричневого и темно-коричневого оттенков. Цвет каждого слоя связан с режимом седиментации трансформированных техногенных взвесей в разные периоды гидрологического цикла. В илах серединного района Кондопожской

губы (ст. К_6 в 15 км от ЦБК, см. рис. 1) в колонке ДО выделяется темный (почти черный) слой (5–15 см) с контрастной нижней границей, являющейся индикатором изменения седиментационного режима залива в начале 80-х гг. прошлого века, произошедшего в результате увеличения мощностей комбината и введения рассеянного выпуска сточных вод станции биологической очистки.

Поступление в донные отложения органического вещества сточных вод привело к изменению химического состава осадка. Уже в начале 90-х гг. прошлого века химические составы ДО вершинной, переходной зоны и глубоководного района залива имели значительные отличия (Васильева, 1986, 1998; Белкина, 2005, 2006; Белкина и др., 2006). По своим физико-химическим характеристикам донные отложения вершинной части залива отличаются высокими значениями естественной влажности (до 98 %), более низкими pH (до 5.2) и меньшими значениями Eh (до –189 мВ). Наиболее высокие концентрации органического вещества обнаружены в осадках, залегающих в районе поступления сточных вод целлюлозно-бумажного комбината. Содержание органического углерода (C_{org}) изменяется от 5 до 38 %, фенолов от 10 до 55 мкг × г^{–1}, нефтепродуктов от 100 до 200 мкг × г^{–1}. Концентрации лигносульфонатов (основного компонента сточных вод ЦБК) – максимальные и превышают их содержание в осадках центральных районов губы на два порядка (от 100 до 600 мкг × г^{–1}) (Белкина, 2005). Содержание азота в этом районе самое высокое (до 1 %), треть его приходится на азот аммонийный, азот органический (N_{org}) составляет здесь 1.4 % ОВ. Распределение показателей органического вещества по глубине колонки донных отложений неравномерное, что свидетельствует об изменении количественного и качественного состава сточных вод ЦБК. Высокое содержание органического вещества определяет высокие скорости потребления O₂ на его окисление (до 39 мг O₂ г^{–1} × сут^{–1}), на два порядка превышающие фоновые значения. В толще ДО протекают процессы анаэробного разложения накопленного органического вещества антропогенного происхождения (разрушение целлюлозы, денитрификация, аммонификация, сульфатредукция, метанообразование). Продукты разложения органического вещества, проникая в воду, частично окисляются на поверхности ДО, что снижает токсическое действие техногенных осадков на водную экосистему залива. При отсут-

ствии O_2 в придонных водах метан, меркаптаны, сероводород, сульфиты, тиосульфаты, сульфаты, лигносульфонаты, фенолы и другие загрязняющие вещества поступают из ДО в воду в значительных количествах.

По мере удаления от ЦБК и ослабления воздействия сточных вод комбината (станция К_4, см. рис. 1) содержание органического вещества в ДО снижается (концентрация C_{org} в поверхностном 5 см слое ДО в районе сброса сточных вод составляет в среднем около 40 %, на удалении 1 км от ЦБК – 22 %, в 4 км от ЦБК – 13 %, в 9 км – 10 %, в 10 км – 8 %), увеличивается мощность окисленного слоя ДО (от 0 до 5 см), в котором на редоксбарьере накапливаются железо, марганец и фосфор.

В илах глубоководного района Кондопожской губы (станция К_6, см. рис. 1) в течение 30 лет до 2005 г. наблюдался рост содержания в ДО органического вещества, Р, N, Fe и Mn (табл. 1). Величина соотношения C:N, изменившаяся за этот период с 7 до 31, и низкие значения гуминового коэффициента ($K_{hum} = C_{hum} : C_{org} = 0.1$) подтверждают техногенный характер накопленного органического вещества осадка. В настоящее время зафиксировано некоторое снижение концентраций органического вещества и биогенных элементов (см. табл. 1). Подобная динамика изменения химического состава ДО прослеживается и на ст. К_7.

Особого внимания заслуживает показатель общего железа, содержание которого в донных отложениях на различных участках дна Кондопожской губы возросло за последние 20–25 лет в 2–5 раз (см. табл. 1). Содержание марганца возросло в 2 раза на станциях К_4 и К_7. Как указывалось в предыдущих публикациях (Калинкина и др., 2016), рост железа и марганца в донных отложениях Онежского озера может быть связан с увеличением стока с водосбора гумусовых веществ, с которыми эти элементы образуют прочные комплексные связи.

Динамика состояния макрозообентоса в Кондопожской губе

Загрязнение Кондопожской губы сточными водами целлюлозно-бумажного комбината привело к формированию в заливе зон, резко различающихся по количественным и структурным характеристикам зообентоса. Данные по химическому составу илов в разных зонах позволяют объяснить экологическую ситуацию на дне залива. В вершинном участке Кондопожской губы, в зоне не-

посредственного поступления сточных вод ЦБК (станция К_3, см. рис. 1) восстановленные осадки, залегающие на площади 2 км², непригодны для жизни гидробионтов. Донные ценозы здесь разрушены полностью, и устойчивого их восстановления не наблюдается до сих пор. Численность и биомасса бентоса на станции К_3 изначально невысокие (0.04–0.4 тыс. экз./м² и 0.027–1.57 г/м²), снизились за исследуемый период 1998–2016 гг. до нуля. В табл. 2 представлена динамика продукции бентосных сообществ в вершинной части Кондопожской губы за последние 18 лет.

Следующая станция К_4 (см. рис. 1) примыкает к зоне сильнейшего угнетения бентосных сообществ в районе сброса сточных вод. На станции К_4 численность и биомасса бентосных сообществ на порядок выше, чем на станции К_3. В этом районе бентос представлен, главным образом, устойчивыми видами из малоштакинковых червей (*Tubifex tubifex*, *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Spiroserpeta ferox*) и личинок хирономид (*Procladius sp.* и *Chironomus sp.*). Реликтовые ракообразные здесь практически отсутствуют (Калинкина и др., 2017а). Необходимо отметить, что донные отложения на станции К_4 по своим качественным и количественным характеристикам, окислительно-восстановительному состоянию и величинам диффузионных потоков минеральных веществ (до 1 г × м⁻² × сут⁻¹), приобрели признаки осадков эвтрофного водоема уже в конце 80-х гг. прошлого века (Васильева, 1986; Белкина, 2014), что, в свою очередь, может быть одной из причин снижения видового разнообразия бентосных сообществ и роста числа олигохет.

В 1999–2016 гг. на станции К_4 отмечали снижение общей численности бентоса от 9.24–33.6 до 0.12–2.68 тыс. экз./м² и общей биомассы – от 9.4–40.6 до 3.7–10.28 г/м². Продукция бентосных сообществ на этой станции в 2011–2016 гг. снизилась в 4.5 раза по сравнению с 1999–2005 гг. (см. табл. 2).

В глубоководном районе Кондопожской губы (станция К_6) влияние сточных вод ЦБК уже заметно ослаблено, о чем свидетельствует появление на этой станции амфипод – реликтовых раков *Monoporeia affinis*, наиболее чувствительных к загрязнению организмов. На протяжении всего периода наблюдения численность и биомасса сообществ бентоса на станции К_6 снижалась. Если в 1998–2005 гг. общая численность составляла 1.78–9.36 тыс. экз./м², а общая биомасса – 2.18–13.96 г/м², то в 2011–2016 гг.

Таблица 1. Химический состав донных отложений Онежского озера (слой 0-5 см)

Период	№ ст.	Eh мВ	pH	C	ППП	N-NH ₄	N _{org}	Fe	Mn	P _{добр}	P _{общ}
				С	ППП	N-NH ₄	N _{org}	Fe	Mn	P _{добр}	P _{общ}
Кондопожская губа											
1991-1999	K_3	89	6,53	19,8	45	0,228	0,70	1,6	0,34	0,13	0,21
2000-2005		11	6,23	16,8	42	0,010	0,63	3,1	0,19	0,14	0,19
2005-2010		282	6,19	26,8	56	0,048	1,01	3,1	0,28	0,18	0,27
1991-2000	K_4	60	6,80	5,1	9	0,007	0,51	0,8	0,09	0,05	0,10
2000-2005		68	6,88	13,1	25	0,057	0,47	3,1	0,27	0,11	0,16
2005-2010		77	6,57	12,4	33	0,073	0,60	3,6	0,14	0,15	0,21
2010-2015		138	6,24	13,7	29	0,008	0,61	3,0	0,17	0,15	0,20
1991-1995	K_6	151	6,77	7,2	27	0,046	0,72	3,2	1,08	0,18	0,27
2000-2005		247	6,67	7,1	21	0,063	0,48	7,0	1,07	0,25	0,31
2005-2010		73	6,73	7,2	18	0,004	0,20	6,6	0,47	0,24	0,28
1990-1995	K_7	301	6,57	2,6	14	0,022	0,62	0,6	0,43	0,07	0,13
2001-2005		366	6,44	4,4	17	0,079	0,30	5,6	0,99	0,15	0,22
2005-2010		374	6,32	4,4	10	0,003	0,15	5,1	1,00	0,13	0,21
Петрозаводская губа											
1990-1995	P_5	112	6,59	1,7	4	0,020	0,20	0,9	0,06	0,06	0,11
2000-2005		290	6,99	3,5	9	0,018	0,19	3,5	0,36	0,13	0,15
2005-2010		335	5,63	3,8	10	0,002	0,11	4,2	0,23	0,15	0,16
1990-1995	P_2	179	6,59	2,8	13	0,021	0,33	1,2	0,93	0,12	0,16
2000-2005		419	6,70	3,9	9	0,019	0,31	5,6	1,19	0,15	0,20
2005-2010		582	6,54	3,8	13	0,003	0,29	5,4	1,43	0,18	0,23
2010-2015		575	6,02	4,4	16	0,004	0,39	5,0	1,72	0,09	0,22
1990-1995	P_3	347	6,59	2,9	12	0,021	0,66	1,3	1,37	0,12	0,16
2000-2005		332	6,78	4,1	12	0,020	0,26	4,7	0,48	0,16	0,21
2005-2010		353	6,08	2,6	10	0,002	0,13	4,9	0,66	0,12	0,17
2016*		472	5,86	4,4	15	0,003					
Большое Онего											
до 2000	B_1	357	6,55	3,6	15	0,041	0,67	1,9	1,25	0,11	0,15
2000-2005		408	6,23	4,6	16	0,023	0,28	7,3	1,48	0,15	0,22
2005-2010		429	6,46	4,2	18	0,013	0,34	7,3	1,48	0,15	0,27
2016 год		569	6,70	4,3	17	0,008	0,57			0,10	0,21
2000-2005	B_2	341	6,14	4,9	13	0,060	0,30	4,7	1,01	0,13	0,21
2005-2010		508	6,41	2,3	14	0,003	0,39	5,2	0,82	0,12	0,18
2016*		656	6,54	4,7	18	0,003	0,50			0,11	0,19
Центральное Онего											
1990-1995	C_1	316	6,69	3,2	17	0,039	0,55	2,5	1,81	0,15	0,31
2000-2005		515	6,41	3,5	17	0,015	0,32	7,2	1,34	0,22	0,29
2005-2010		344	6,40	2,9	14	0,002	0,20	7,6	0,82	0,27	0,34
2010-2017		459	6,61	2,9	13	0,003	0,30	3,4	0,98	0,08	0,28

Примечание: * – единичные пробы.

эти показатели снизились соответственно до 0.68–2.72 тыс. экз./м² и 0.32–7.68 г/м². Сходные процессы наблюдаются на станции K_7, расположенной в буферном участке Кондопожской губы, сопредельном с заливом

Большое Онего (см. рис. 1). На станции K_7 отмечалось синхронное снижение численности амфипод и олигохет (основных представителей сообществ), коэффициент корреляции составил 0.78 (n = 22; p < 0.05). В то

Таблица 2. Динамика показателей продукции сообществ глубоководного бентоса в различных районах Онежского озера в 1998–2016 годах

Период	№ ст.	Продукция (ккал/м ² за сезон – 180 сут.)		
		Средняя	Минимум	Максимум
Кондопожская губа				
1998-2005	K_3	0,255	0,003	0,781
2006-2010		0,052	0	0,166
2011-2016		0	0	0
1999-2005	K_4	7,711	3,188	15,801
2007-2010		2,630	1,728	3,845
2011-2016		1,747	0,594	5,035
1998-2005	K_6	2,099	0,569	3,234
2006-2010		1,722	1,374	2,453
2011-2016		0,512	0,051	0,968
1998-2005	K_7	1,854	0,589	3,177
2006-2010		1,712	0,772	2,392
2011-2016		0,624	0,188	1,156
Петрозаводская губа				
1998-2005	P_5	0,876	0,421	1,391
2006-2010		0,995	0,894	1,085
2011-2016		0,258	0,055	0,839
1998-2005	P_2	2,876	2,064	3,574
2007-2010		1,756	1,582	2,050
2012-2016		0,774	0,258	1,399
1998-2005	P_3	2,919	2,103	3,689
2007-2010		1,731	1,401	2,128
2011-2016		1,417	0,443	2,412
Большое Онего				
1998-2005	B_1	0,425	0,181	0,599
2006-2010		0,285	0,251	0,320
2011-2016		0,204	0,002	0,424
2001-2004	B_2	0,659	0,570	0,709
2008-2010		0,365	0,232	0,498
2011-2016		0,313	0,056	0,590
Центральное Онего				
1998-2005	C_1;C_2; C_3;	0,454	0,322	0,541
2007-2010	C_4*	0,293	0,128	0,424
2011-2016		0,159	0,090	0,278

Примечание: * - даны показатели для четырех центральных станций.

же время на станции K_6 синхронность изменения показателей развития амфиопод и олигохет отсутствовала, коэффициенты корреляции были недостоверны. Показатели численности хирономид не были достоверно связаны с численностью амфиопод и олигохет.

Динамика снижения продукции бентоса на станциях K_6 и K_7 в Кондопожской губе представлена на рис. 2 и в табл. 2. На этих станциях продукция снижалась от 1.854–2.099 ккал/м² за сезон (в 1998–2005 гг.) до 0.512–0.624 ккал/м² за сезон (в 2011–2016 гг.), т. е. в 3–4 раза.

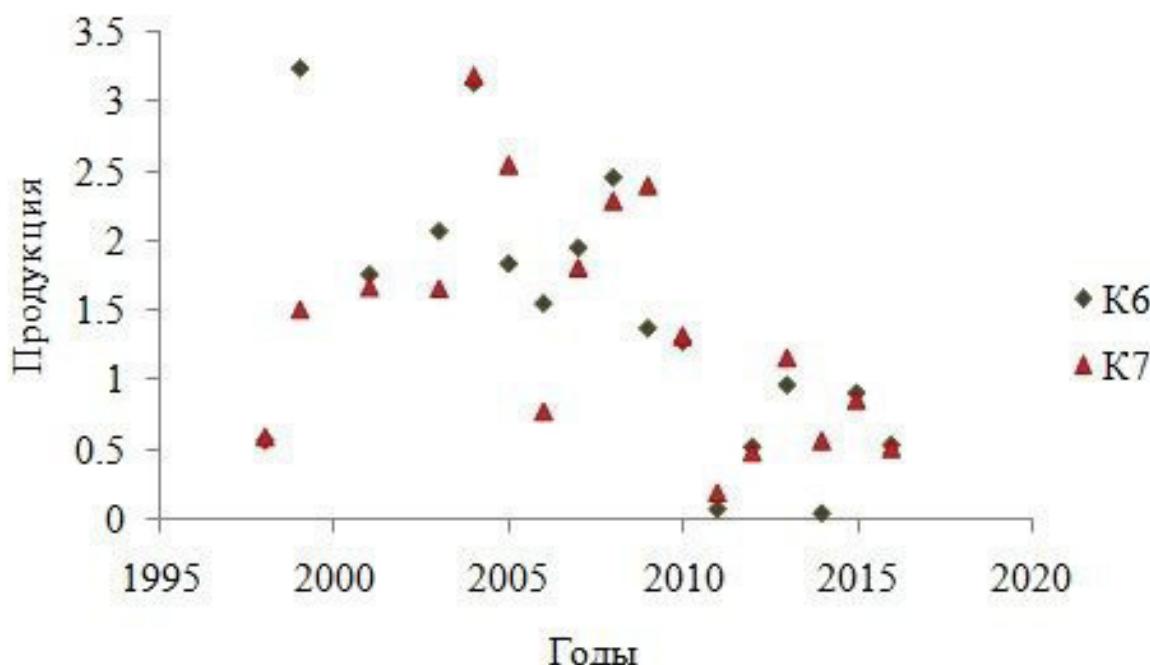


Рис. 2. Показатели продукции глубоководного бентоса (ккал/м² за сезон – 180 сут.) в буферной зоне Кондопожской губы (станции K_6; K_7) в 1998–2016 гг.

Fig. 2. Production of deepwater benthos (kcal / m² per season – 180 days) in the buffer zone of Kondopozhskaya Bay (stations K_6; K_7) in 1998–2016

Петрозаводская губа

Химический состав донных отложений в Петрозаводской губе

Донные отложения Петрозаводской губы являются минеральными осадками (зольность выше 80 %), которые формируются в результате смешения озерных, речных, сточных вод и ливневого стока с территорией г. Петрозаводска. Степень влияния каждой составляющей на донные отложения разных районов залива зависит от гидродинамического режима, удаленности от источника поступающего взвешенного материала и внутриводоемных процессов. Илы занимают 41 % площади дна залива (44 км²). Концентрация органического вещества в поверхностном слое составляет в среднем около 16 %. В 70-е годы прошлого века в результате застройки прибрежной территории залива, увеличения поступления объемов промышленных и хозяйствственно-бытовых стоков г. Петрозаводска и активного сельскохозяйственного освоения водосборной территории р. Шуя изменился качественный и количественный состав взвешенного вещества, оседающего в ДО: увеличилось содержание органических веществ и биогенных элементов, возросла доля гуминовых и фульвовых кислот в составе органических веществ и как следствие увеличилось содержание железа

и марганца, поступающих с водосборной площади. Концентрации биогенных элементов в донных отложениях изменяются от 0.1 до 0.5 % N_{орг.} и от 0.1 до 0.3 % P_{общ.}. По мере удаления от устья р. Шуя отношение C:N для новообразовавшихся осадков изменяется от 22 до 16 и C:P – от 70 до 50. Изучение динамики содержания C_{орг.}, N_{орг.}, P_{общ.} в поверхностном слое илов (0–5 см) на станциях P_2 и P_3 показало снижение концентраций этих элементов после достижения максимальных значений в 90-е гг. (см. табл. 1). Вполне вероятно, что такая динамика связана с особенностями развития биологических процессов в водной толще, происходящих вследствие неравномерных изменений внешней нагрузки, с одной стороны, с особенностями трансформации органического вещества в донных отложениях, связанных с жизнедеятельностью бентосных организмов, – с другой.

Распределение биогенных элементов в колонке донных отложений неравномерно, что, скорее всего, связано и с неравномерным поступлением органического вещества в донные отложения, и с диагенетическими преобразованиями осадка в зоне редокс-барьера. Вертикальный профиль фосфора и в твердой фазе, и в поровых водах закономерно повторяет профиль железа с максимумами их содержания в зоне редокс-барьера

(до 0.3 % Р и 8 % Fe). Наибольшие изменения произошли в накоплении Mn, его концентрация в 100 раз превышает кларковые значения (до 1 %). Как и в Кондопожской губе, в донных отложениях Петрозаводской губы за исследуемый период 1990–2010 гг. содержание железа возросло в 4 раза (см. табл. 1).

Динамика состояния макрозообентоса в Петрозаводской губе

В вершинном участке Петрозаводской губы (станция Р_5, см. рис. 1) бентос представлен в основном олигохетами, доля которых в общей численности в разные годы исследований составляла 15–52%, а также представителями хирономид (доля от общей численности – 27–80 %). Амфиоподы мало встречаются в вершинном участке залива (доля от общей численности – 0–37 %), что связано с влиянием речных вод, обогащенных органическим веществом, железом и загрязняющими веществами с водосбора.

В 1998–2005 гг. происходило увеличение показателей развития и продукции сообщества, которое затем сменилось ее снижением (см. табл. 2). При этом численность и олигохет, и хирономид на всех этапах трансформации сообществ изменялась синхронно, коэффициент корреляции составил 0.83 ($n = 21$, $p < 0.05$). В целом за период 2006–2016 гг. средняя продукция бентоса за сезон снизилась в 4 раза.

В серединной глубоководной зоне Петрозаводской губы (станции Р_2; Р_3) по биомассе доминируют реликтовые раки *Monoporeia affinis*. Доля амфиопод в общей численности бентоса в период наблюдения на этих станциях варьировала в пределах 21–75 %, олигохет – 18–54 %, хирономид – 1–28 %. На протяжении 1998–2016 гг. на станциях Р_2 и Р_3 происходило снижение численности и биомассы бентоса. Если в начальный период наблюдения (1998–2005 гг.) общая численность составляла 2.84–7.07 тыс. экз./м², а биомасса – 6.97–25.82 г/м², то в последующие годы (2017–2016 гг.) общая численность бентоса снизилась до 0.44–5.22 тыс. экз./м², а биомасса – до 1.2–10.99 г/м². Коэффициент корреляции между показателями численности амфиопод и олигохет на станции Р_2 составил: $r = 0.48$ ($n = 23$, $p < 0.05$). На станциях Р_3 синхронность изменения показателей развития амфиопод и олигохет отсутствовала, коэффициенты корреляции были недостоверны.

Динамика снижения продукции бентоса на станция Р_2 и Р_3 в Петрозаводской губе представлена на рис. 3 и в табл. 2. В сере-

динных участках Петрозаводской губы продукция снижалась от 2.876–2.919 ккал/м² за сезон в 1998–2005 гг. до 0.774–1.417 ккал/м² за сезон в 2011–2016 гг., т. е. в 2–4 раза.

Глубоководные районы Онежского озера

Химический состав донных отложений в центральных районах Онежского озера

Минеральные осадки центральных районов, так же как и донных отложений в заливах, отреагировали на изменения внешней нагрузки на озеро. К началу XXI века содержание органического вещества и биогенных элементов в илах увеличилось в 2.5 и 3 раза (Онежское озеро..., 2010). Например, динамика концентрации С_{орг} в поверхностном (0–5 см) слое донных отложений ст. С1 (рис. 4) показывает более высокие содержания углерода в конце вегетационного периода (август, сентябрь) по сравнению с июнем, что указывает на цикличность процесса разложения органического вещества. Так же, как и в случае с Петрозаводской губой, наблюдается максимум содержания в начале 1990-х гг. и постепенное снижение концентрации в последние 20 лет, что, вероятно, свидетельствует о снижении производственных процессов в озере в целом. Если оценить тренд углерода за 10 лет, с 2005 по 2016 г., то средняя скорость уменьшения концентрации углерода в слое 5 см соответствует 27 мг Схм⁻²сут⁻¹.

Постоянное присутствие кислорода в придонных водах и высокие содержания железа и марганца во взвешенном веществе, поступающем в донные отложения (до 7 % Fe, 1 % Mn), определяют их накопление в поверхностном окисленном слое ДО. Процесс диагенетической дифференциации элементов по вертикали ДО зависит от глубины проникновения кислорода и темпа осадконакопления (Белкина и др., 2016). Повсеместно в илах центральных районов озера на окислительно-восстановительном барьере образуются разделенные рудные прослойки Mn и Fe, отличающиеся не только физическими и химическими характеристиками, но и визуально (окисленные соединения Mn имеют черную окраску, а Fe – оранжевую) (рис. 5). Необходимо отметить, что высокая концентрация этих элементов приводит к образованию в донных отложениях аутигенных минеральных фаз Fe и Mn разной степени восстановления и обособления этих элементов (Страховенко и др., 2017).

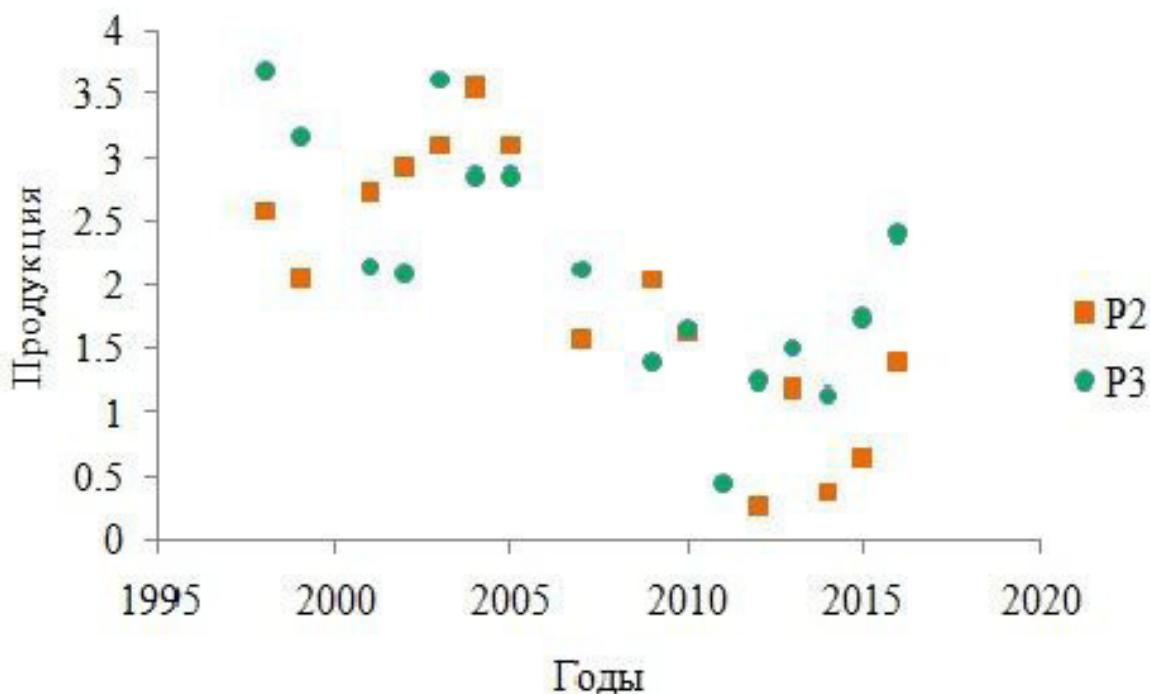


Рис. 3. Показатели продукции глубоководного бентоса (ккал/м² за сезон – 180 сут.) в серединной части Петрозаводской губы (станции P₂; P₃) в 1998–2016 гг.

Fig.3. Production of deepwater benthos (kcal / m² per season – 180 days) in the buffer zone of Petrozavodskaya Bay (stations P₂; P₃) in 1998–2016

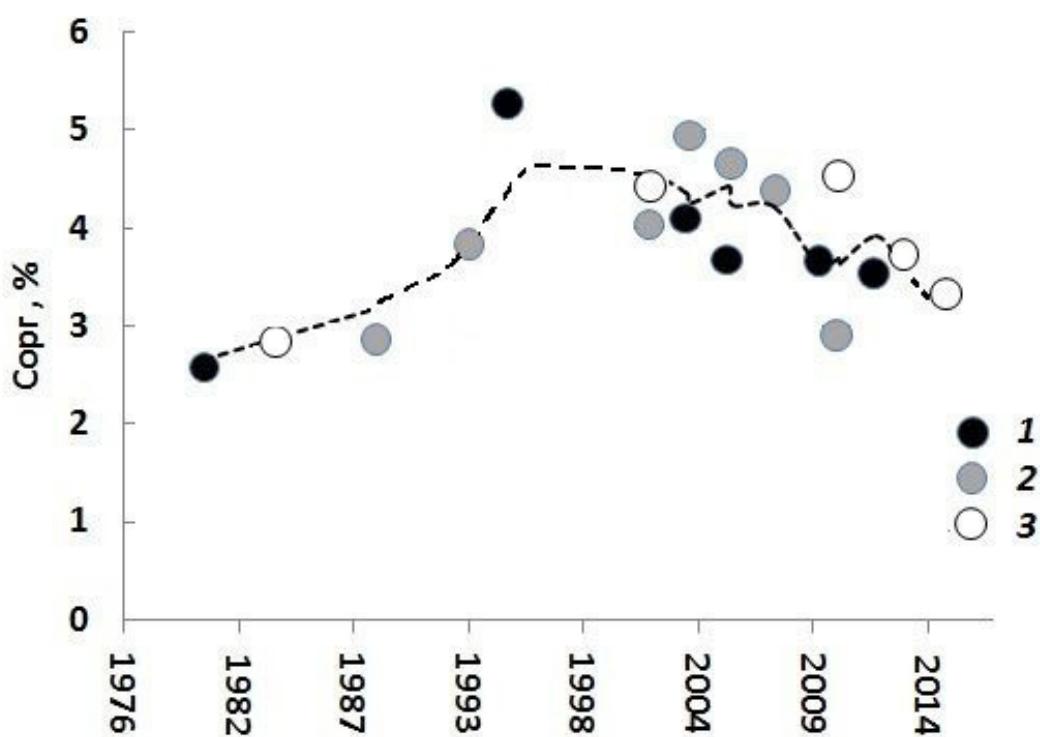


Рис. 4. Динамика изменения концентрации С_{орг} в поверхностном слое (0–5 см) ДО; ст. С1; 1 – июнь, 2 – август, 3 – сентябрь

Fig. 4. The dynamics of the change in the concentration of Corg in the surface layer (0–5 cm) of bottom sediments; station C1; 1 – June, 2 – August, 3 – September

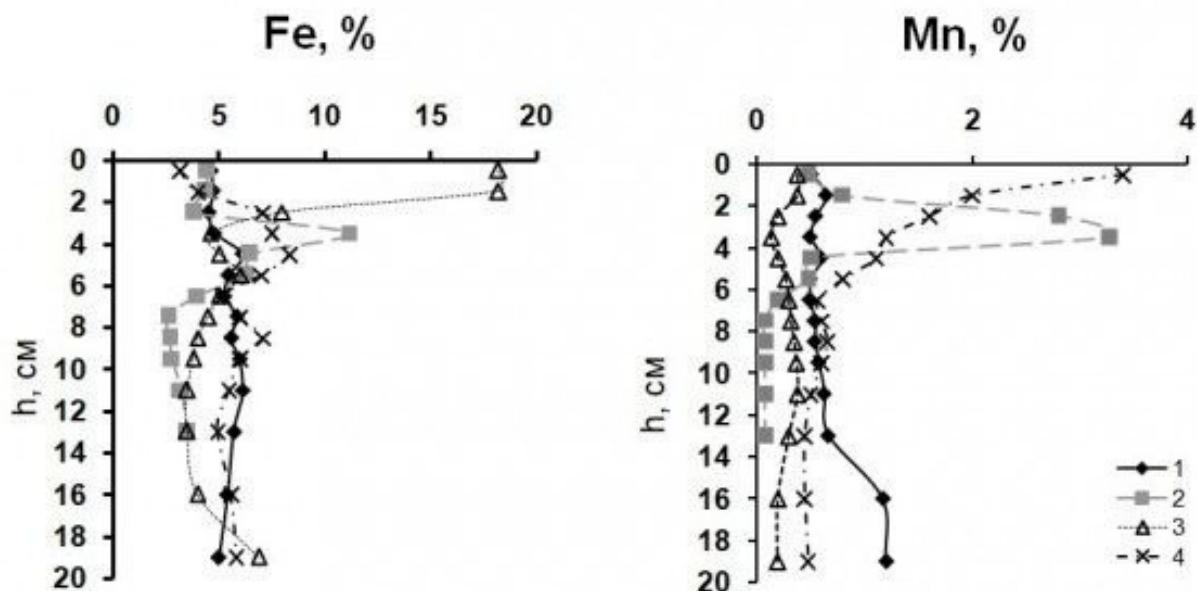


Рис. 5. Вертикальное распределение Fe и Mn в поверхностном слое ДО центрального района Онежского озера. 1 – глубина залегания 42 м, 2 – 48 м, 3 – 81 м, 4 – 85 м

Fig. 5. Vertical distribution of Fe and Mn in the surface layer of bottom sediments of the central region of Lake Onega: 1 – depth of occurrence 42 m, 2 – 48 m, 3 – 81 m, 4 – 85 m

Динамика состояния макрозообентоса в глубоководных районах Онежского озера

В глубоководном районе Онежского озера, заливе Большое Онего (станции В_1 и В_2; см. рис. 1), показатели развития бентоса характеризовались невысокими значениями, которые на протяжении всего периода изучения постепенно снижались. В начале наблюдения (1998–2005 гг.) в заливе Большое Онего общая численность изменялась в пределах 0.62–2.82 тыс. экз./м², биомасса – 2.46–5.46 г/м². В составе сообщества доля амфиопод в общей численности составляла 27–61 %, олигохет – 22–53 % от общей численности, доля хирономид – 5–30 %. В последние годы численность и биомасса бентосных сообществ в заливе Большое Онего существенно снизились. Показатели численности в 2006–2016 гг. составили 0.04–1.8 тыс. экз./м², биомассы – 0.02–4.03 г/м². Снижение показателей развития главных представителей бентоса (амфиопод и олигохет) в заливе Большое Онего происходило синхронно. Коэффициенты корреляции между численностью амфиопод и олигохет были достоверны (станции В_1 и В_2): 0.55–0.86 ($n = 15–18$, $p < 0.05$).

В Большом Онего на станциях В_1 и В_2 в результате снижения численности и биомассы уменьшалась продукция бентосных сооб-

ществ: от 0.659–0.425 до 0.204–0.213 ккал/м² (рис. 6; см. табл. 2). Кратность снижения продукции сообществ бентоса в 1998–2016 годах составила 2–3 раза.

В литературе имеются сведения по продукции глубоководных сообществ бентоса залива Большое Онего в 1978–1979 гг. (Алимов и др., 1982). Показатели продукции, отмечаемые почти 36 лет назад, варьировали в пределах 0.386–1.649 (среднее 1.017) ккал/м². Литературные данные за 1978–1979 года ближе к результатам наших наблюдений за 1998–2005 гг. Наблюдаемые нами в 2016 г. показатели продукции бентоса в заливе Большое Онего оказались в 2–8 раз меньше величин, отмеченных в этом районе в 1978–1979 гг.

В Центральном Онего (станции С_1; С_2; С_3; С_4, см. рис. 1) в донных ценозах наблюдаются процессы, сходные с другими районами озера: снижение численности, биомассы и продукции бентосных сообществ (см. рис. 6, табл. 2). Для центрального глубоководного района (станции С_1; С_2; С_3; С_4) отмечали одновременное снижение представителей амфиопод и олигохет, коэффициент корреляции был достоверным: – 0.41 ($n = 54$, $p < 0.05$). Величина средней продукции бентоса за сезон в центре озера уменьшилась с 0.454 ккал/м² в 1989–2005 гг. до 0.159 ккал/м² в 2011–2016 гг.

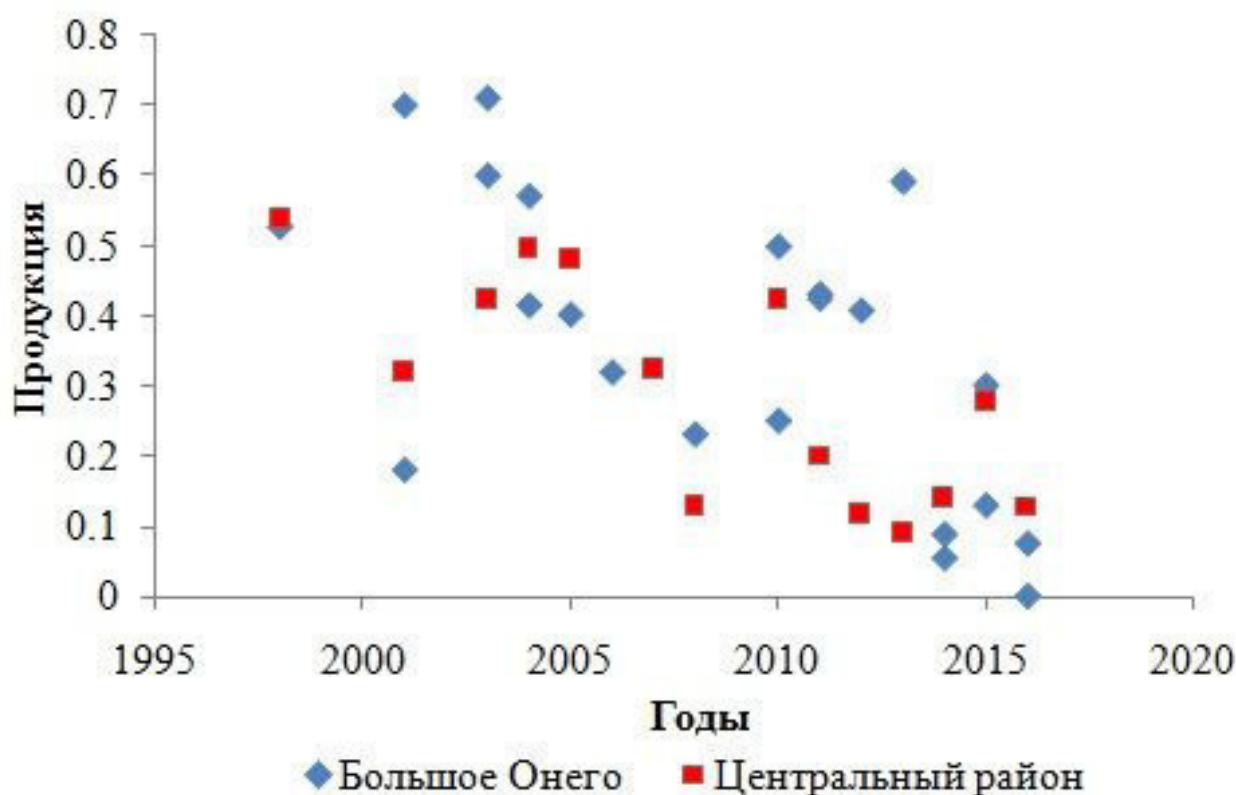


Рис. 6. Показатели продукции (ккал/м² за сезон – 180 сут.) глубоководного бентоса в Большом Онего и Центральном районе Онежского озера в 1998–2016 гг.

Fig. 6. Production of deepwater benthos (kcal / m² per season – 180 days) in Big Onega and in the Central part of Lake Onega in 1998–2016

Обсуждение

Согласно данным 1998–2016 гг., в Онежском озере четко выделяются три зоны (см. рис. 1), в пределах которых донные ценозы различаются по структурным показателям, что хорошо согласуется с результатами предшествующих исследований (Калинкина и др., 2017а). Первая зона приурочена к районам интенсивного антропогенного воздействия, которое отмечается в вершинном районе Кондопожской губы (станции K_3; K_4) и Петрозаводской губы (станция P_5). Кондопожская губа загрязняется сточными водами ЦБК. В Петрозаводскую губу поступают воды р. Шуи, на водосборе которой находится большое количество поселений, сельскохозяйственные угодья, мелиоративные сооружения. Сообщества бентоса в вершинных участках заливов характеризуются бедным видовым составом, высокими показателями развития олигохет, главным образом, одного вида, устойчивого к органическому загрязнению, – *Tubifex tubifex*. Численность хирономид здесь также повышена. Амфиоподы (реликтовые ракообразные) в первой зоне практически отсутствуют.

Особенности бентосных сообществ в первой зоне можно объяснить данными по химическому составу донных отложений. Так, в вершинном участке Кондопожской губы для донных отложений характерны низкие величины pH, Eh, высокие концентрации органического вещества, токсикантов (лигносульфонатов, фенолов, нефтепродуктов). Дефицит кислорода обуславливает поступление токсичных веществ из донных отложений в придонные слои воды. Здесь могут выживать только наиболее резистентные представители из группы олигохет. Бедность видового состава в приустьевых участках на дне Петрозаводской губы связана с интенсивным накоплением здесь аллохтонного органического вещества, в том числе загрязняющих компонентов, которые поступают в губу с водами реки Шуя, одного из основных притоков Онежского озера. В вершинных участках двух заливов илы характеризуются токсичными свойствами (Калинкина и др., 2017б).

Сопредельные с открытыми районами озера участки Кондопожской губы (станции K_6 ; K_7) и Петрозаводской губы (станции

P_2; P_3) – своеобразные буферные зоны, в которых отмечается, с одной стороны, повышенное содержание органического вещества за счет его поступления из вершинных районов заливов. С другой стороны, во внешние участки заливов поступают насыщенные кислородом озерные воды из глубоководных районов. Илы в этих районах характеризуются более мощным окисленным слоем. Наличие питательных веществ на дне и достаточное содержание кислорода в придонных участках воды определяют во второй зоне высокие показатели развития и продукции донных сообществ, в том числе доминирование требовательных к кислороду амфипод.

Третья зона занимает глубоководную часть озера – Центральное Онего (станции C_1; C_2; C_3; C_4) и Большое Онего (станции B_1; B_2). В центральном глубоководном районе озера для представителей всех групп бентоса характерны минимальные показатели численности и биомассы, а также пропорциональное развитие основных групп бентоса – амфипод, олигохет и хирономид. Донные осадки центральных районов глубоководных районов Онежского озера (Большое Онего и Центральное Онего) характеризуются наименьшим содержанием органического вещества. Здесь отмечаются рудные корки, железисто-марганцевые конкреции, что и определяет невысокие показатели развития бентоса. Кроме того, в последние годы на дне Онежского озера выявлены зоны геохимических аномалий (Borodulina, Belkina, 2013), которые могут быть причиной лимитирования развития бентосных организмов в глубоководных районах.

Исследования показали, что во всех трех зонах за период 1998–2016 гг. показатели продукции сообществ глубоководного бентоса снизились в 2–4 раза. В настоящее время наименьшие показатели бентоса отмечаются в центральном глубоководном районе озера. В буферных зонах Петрозаводской и Кондопожской губ продукция бентоса также снизилась, однако остается в 2–7 раз выше, чем в центральном районе озера. Возможной причиной масштабного снижения показателей обилия и продукции бентоса является повсеместное увеличение на дне Онежского озера железа. Как следует из данных, представленных в табл. 1, резкое увеличение содержания в илах железа отмечается начиная с 2000-х гг. Именно с этого времени продукция бентосных сообществ снижается особенно быстро (см. табл. 3). Для буферных

зон Кондопожской и Петрозаводской губ, где отмечали наибольшие показатели развития бентоса, был рассчитан коэффициент корреляции Спирмена между содержанием железа в илах и величиной продукции бентоса в разные периоды исследования. Коэффициент корреляции оказался достоверным и составил -0.63 ($n = 12$; $p < 0.05$), что подтверждает гипотезу об угнетающем воздействии железа на донные сообщества.

Установлено, что пороговая концентрация общего железа, оказывающая угнетающее действие на бентосных животных (личинок амфибиотических насекомых), составляет около 8 мг/л. Основной механизм воздействия соединений железа (III) на водные организмы заключается в угнетении органов дыхания и пищеварения за счет их забивания частицами окислов железа (Vuori, 1995). В то же время в поровых водах ДО Петрозаводской губы в 2013 г. была обнаружена концентрация общего железа 13 мг/л, превышающая пределы вредного воздействия железа на бентосные организмы. Эти данные могут быть дополнительным доказательством гипотезы о повышении содержания железа в илах как причине снижения показателей жизнедеятельности зообентоса на дне Онежского озера.

В свою очередь, возрастание содержания железа в поверхностном слое илов может быть связано с изменениями на водосборной территории Онежского озера, а именно с увеличением влияния речного стока на водоем. В последние 20 лет в Карелии наблюдаются мягкие зимы, увеличивается доля жидких осадков по сравнению с твердыми (Назарова, 2008, 2015). В этот же период в Северо-Западном регионе России отмечается более слабое промерзание почвы и увеличение стока с болотных массивов в зимний период (Калюжный, Лавров, 2012). Таким образом, причиной угнетения бентосных сообществ Онежского озера являются новые климатические условия, вызывавшие увеличение поступления в озеро железа в составе гумусовых веществ и его накопление на дне.

Заключение

Антропогенный фактор вызывает глубокие преобразования физико-химического состава ДО в северо-западных заливах – Кондопожской и Петрозаводской губах Онежского озера. Наиболее изменчивым показателем химического состава ДО Онежского озера является содержание органического вещества

и биогенных элементов. Изменения концентраций С, N, P зависят от особенностей развития в озере продукционных процессов и интенсивности диагенетических преобразований с участием бентосных организмов.

Изменчивость содержания химических элементов неорганической части ДО зависит от изменения терригенной составляющей водного стока. В настоящее время в илах Онежского озера наблюдается накопление металлов (Mn, Fe).

Исследования 1998–2016 гг. показали, что в различных районах Онежского озера происходит масштабная трансформация глубоководных бентосных сообществ. В северо-

западных заливах (Кондопожская и Петрозаводская губы) и глубоководных участках (залив Большое Онего, Центральное Онего) уменьшились показатели численности и биомассы бентосных сообществ, их продукция за последние 25 лет снизилась в 2–4 раза.

Причиной угнетения сообщества глубоководного бентоса и снижения показателей его функционирования является накопление на дне железа, связанное с увеличением его поступления в озеро с речным стоком.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института водных проблем Севера КарНЦ РАН.

Библиография

- Алимов А. Ф. Функциональная экология пресноводных двустворчатых моллюсков. Л.: Наука, 1981. 248 с.
- Алимов А. Ф. Продуктивность сообществ беспозвоночных макробентоса в континентальных водоемах СССР (обзор) // Гидробиологический журнал. 1982. Т. 18. № 2. С. 7–18.
- Алимов А. Ф., Финогенова Н. П., Балушкина Е. В., Баталова Ф. М., Кауфман З. С., Полякова Т. Н., Цалолихин С. Я. Продуктивность бентоса // Лимнологические исследования на заливе Онежского озера Большое Онего: Сб. научных трудов / Под ред. Г. Г. Винберга. Л.: Зоологический институт АН СССР, 1982. С. 170–199.
- Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 490 с.
- Балушкина Е. В. Функциональное значение личинок хирономид в континентальных водоемах. Л.: Наука, 1987. 180 с.
- Балушкина Е. В., Голубков С. М., Иванова М. Б., Никулина В. Н., Умнов А. А., Умнова Л. П. Опыт прогнозирования последствий эвтрофирования Лекшмозера на основе закономерностей функционирования экосистем // Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий. СПб.: ЗИН РАН, 1997. С. 228–265.
- Белкина Н. А. Ретроспективная оценка донных отложений Кондопожской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 6. С. 689–699.
- Белкина Н. А. Загрязнение нефтепродуктами донных отложений Петрозаводской губы Онежского озера // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 181–187.
- Белкина Н. А. Химический состав донных отложений Онежского озера // Состояние водных объектов республики Карелия. По результатам мониторинга 1998–2006 гг. / Ред. П. А. Лозовик. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2007. С. 40–48.
- Белкина Н. А. Роль донных отложений в процессах трансформации органического вещества и биогенных элементов в озерных экосистемах // Труды Карельского научного центра РАН. Водные проблемы Севера и пути их решения. 2011. № 4. С. 35–41.
- 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. 152–158.
- Белкина Н. А. Внутренняя фосфорная нагрузка в Онежском озере // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 2015а. С. 95–103.
- Белкина Н. А. Фосфор в донных отложениях Онежского озера // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. 2015б. № 173. С. 97–109.
- 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.
- Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Наука и образование. 2016. № 3 (83). С. 135–139.
- 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.
- Васильева Е. П. Химический состав донных отложений Онежского озера // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1998. С. 52–54.
- Георгиев А. П., Назарова Л. Е. Трансформация ихтиофауны в пресноводных экосистемах Республики Карелия в условиях изменчивости климата // Экология. 2015. № 4. С. 272–279.
- Заика В. Е. Удельная продукция водных беспозвоночных. Киев: Наукова думка, 1972. 144 с.
- Калинкина Н. М., Сидорова А. И., Полякова Т. Н., Белкина Н. А., Березина Н. А., Литвинова И. А. Снижение численности глубоководного макрозообентоса Онежского озера в условиях многофакторного воздействия // Принципы экологии. 2016. Т. 5. № 2. С. 47–68. DOI: [10.15393/j1.art.2016.5Lake182](https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.5Lake182).
- Калинкина Н. М., Белкина Н. А., Сидорова А. И. Биогеохимические подходы к оценке состояния донных сообществ Онежского озера // Биоиндикация и мониторинг пресноводных экосистем III: Материалы международной конференции / Под ред В. А. Румянцева, И. С. Трифоновой. СПб.: Свое издательство, 2017а. С. 134–137.
- Калинкина Н. М., Белкина Н. А., Сидорова А. И., Галибина Н. А., Никерова К. М. Биотестирование донных отложений Онежского озера с учетом их химического состава и показателей состояния глубоководного макрозообентоса // Принципы экологии, 2017б. Т. 6. № 1. С. 25–55. DOI: [10.15393/j1.art.2017.6022](https://doi.org/10.15393/j1.art.2017.6022).
- Калюжный И. Л., Лавров С. А. Гидрофизические процессы на водосборе: экспериментальные исследования и моделирование. СПб: Нестор-История, 2012. 616 с.
- Камлюк Л. В. Энергетический обмен у свободноживущих плоских и кольчатых червей и факторы его определяющие // Журнал общей биологии. 1974. Т. 35. № 6. С. 847–885.
- Кухарев В. И., Полякова Т. Н. О приближенной оценке продукции зообентоса водоемов Карелии при экологических исследованиях // Притоки Онежского озера. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1990. С. 127–141.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при ведении мониторинга биологического загрязнения на Финском заливе / Под ред. А. Ф. Алимова, Т. М. Флоринской. СПб., 2005. 68 с.
- Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоемах. Зообентос и его продукция. . Л., 1984. 52 с.
- Назарова Л. Е. Многолетние изменения температуры воздуха в Карелии // География и природные ресурсы. 2008. № 3. С. 75–79.
- Назарова Л. Е. Атмосферные осадки в Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 9. С. 114–120.
- Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2010. 151 с.
- Орлов Д. С., Гришина Л. А., Ерошичева Н. Л. Практикум по биохимии гумуса. М.: МГУ, 1969. 157 с.
- Перова С. Н. Изменения структуры и обилия макрозообентоса Волжского плеса Рыбинского водохранилища в период потепления // Биоиндикация и мониторинг пресноводных экосистем III: Материалы международной конференции / Под ред В. А. Румянцева, И. С. Трифоновой. СПб.: Свое издательство, 2017. С. 248–251.
- ПНД Ф 14.1;2;4.139-98. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца в пробах питьевых, природных и сточных вод методом атомно-абсорбционной спектроскопии. М., 1998.
- Полякова Т. Н. Донные ценозы в условиях антропогенного эвтрофирования // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: Изд-во КарНЦ РАН, 1999. С. 211–227.
- Полякова Т. Н. Макрозообентос // Крупнейшие озера-водохранилища Северо-Запада европейской территории России: современное состояние и изменения экосистем при климатических и антропогенных воздействиях / Под ред. Н. Н. Филатова, Н. М. Калинкиной, Т. П. Куликовой, А. В. Литвиненко, П. А. Лозовика. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2015. С. 127–133.
- РД 52.24.382-2006, РД 52.24.382-95. Массовая концентрация фосфатов и полифосфатов в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом. . Ростов н/Д, 2006.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / Под. ред. Л. В. Боевой. Ростов н/Д: НОК, 2009. 104 с.
- Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Даниленко И. В., Субетто Д. А., Белкина Н. А., Ефременко Н. А. Минерало-геохимическая характеристика процесса современного седиментогенеза Онежского озера // Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Материалы 1-й Международной конференции (11–15 сентября 2017 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. С. 418–425.

- Сущеня Л. М. Интенсивность дыхания ракообразных . Киев: Наукова думка, 1972. 196 с.
- Сущеня Л. М. Количественные закономерности питания ракообразных . Минск: Наука и техника, 1975. 208 с.
- Филатов Н. Н., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Назарова Л. Е., Пальшин Н. И., Руховец Л. А., Толстиков А. В., Шаров А. Н. Реакция озер Восточной Фенноскандии и Восточной Антарктиды на изменения климата // Доклады Академии наук. 2012. Т. 444. № 5. С. 554–557.
- Филатов Н. Н., Руховец Л. А., Назарова Л. Е., Георгиев А. П., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И. Влияние изменений климата на экосистемы озер Севера Европейской территории России // Ученые записки [Российского государственного гидрометеорологического университета](#). 2014. № 34. С. 48–55.
- Hakanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.
- Borodulina G. S., Belkina N. A. Study of the geochemical anomalies at the water-sediment boundary in subaqueous groundwater discharge zones in lake Onega // Book of abstract. 32nd congress of the international society of limnology. Budapest. August 4–9. Budapest, 2013. P. 191.
- Vuori K.-M. Direct and indirect effects of iron on river ecosystems // Ann. Zool. Fennici. 1995. № 32. P. 317–329.

DYNAMICS OF BENTHIC COMMUNITIES STATE AND THE SEDIMENT CHEMICAL COMPOSITION IN LAKE ONEGA UNDER THE INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC AND NATURAL FACTORS

KALINKINA
Nataliya Mikhailovna

Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, cerioda@mail.ru

BELKINA
Nataliya Aleksandrovna

Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences Northern Water Problems Institute, bel110863@mail.ru

Key words:
anthropogenic impact
climatic changes
Lake Onega
bottom sediments
chemical composition
deepwater benthos
community structure
production.

Summary: We consider the dynamics of the sediment chemical composition and benthic community state in different areas of Lake Onega in the last 20–25 years. It is shown that the combined effect of anthropogenic factors and climate changes has caused a profound transformation of deepwater benthic communities. The upper parts of the northwestern bays (Kondopozhskaya and Petrozavodskaya bays), where the effect of anthropogenic factors is the most manifested, are referred to the most contaminated (first) zone. In these areas, structural adjustments of bottom cenoses are noted; they are the dominance of resistant representatives of oligochaetes and chironomids and the absence of relict crustaceans. The sediments of the first zone are characterized by the greatest content of organic matter, reduced values of pH and Eh, the presence of toxic agents (in Kondopozhskaya Bay). In the buffer areas of the north-western bays referred to the second zone the anthropogenic effect is weakened by the influence of oxygen-saturated waters passing from the adjacent open areas of the lake. The bottom sediments of the buffer zones are characterized by a deeper oxidized layer and the maximum development of amphipods. The central deep-water areas of Lake Onega (the third zone) are currently the least affected by the anthropogenic factor. The sediments in the central zone are characterized by the minimum content of organic matter, the presence of ore crusts (containing iron and manganese), which determine the poor development of benthos here. In 1998–2016 in all studied areas of Lake Onega classified as three zones a decrease in the numbers and biomass of benthos occurred, which led to a decrease in its production by 2–4 times. It is suggested that the decline in benthic community indicators is caused by the suppressive action of iron, which is accumulated in sediments. The reason of that is an increasing input of this element with river waters as a part of humic substances due to climatic changes in the catchment area.

Reviewer: D. B. Denisov

Received on: 13 March 2018

Published on: 30 June 2018

References

- Alimov A. F. Finogenova N. P. Balushkina E. V. Batalova F. M. Kaufman Z. S. Polyakova T. N. Calolihin S. Ya. Productivity of benthos, Limnologicheskie issledovaniya na zalive Onezhskogo ozera Bol'shoe Onego: Sb. nauchnyh trudov, Pod red. G. G. Vinberga. L.: Zoologicheskiy institut AN SSSR, 1982. P. 170–199.
- Alimov A. F. Funkcional'naya ekologiya presnovodnyh dvustvorchatyh mollyuskov. L.: Nauka, 1981. 248 p.
- Alimov A. F. Productivity of macrobenthic invertebrate communities in the inland waters of the USSR (review), Gidrobiologicheskiy zhurnal. 1982. T. 18. No. 2. P. 7–18.
- Arinushkina E. V. Guidelines for the chemical analysis of soils. M.: MGU, 1970. 490 p.
- Balushkina E. V. Golubkov S. M. Ivanova M. B. Nikulina V. N. Umnov A. A. Umnova L. P. Experience in predicting the effects of eutrophication of Lake Lekshmozero based on the patterns of the ecosystems

- functioning, Reakciya ozernyh ekosistem na izmenenie bioticheskikh i abioticheskikh usloviy. SPb.: ZIN RAN, 1997. P. 228–265.
- Balushkina E. V. The functional significance of chironomid larvae in inland watersL.: Nauka, 1987. 180 p.
- Belkina N. A. Sandman O. Ignat'eva N. V. Distribution of phosphorus forms in bottom sediments as an indicator of eutrophication of the ecosystem of large lakes (on the example of the Ladoga and Onega lakes), Ekologicheskaya himiya. 2006. No. 15 (3). P. 174–185.
- Belkina N. A. Subetto D. A. Efremenko N. A. Kulik N. V. Peculiarities of distribution of microelements in the surface layer of bottom sediments of Lake Onega, Nauka i obrazovanie. 2016. No. 3 (83). P. 135–139.
- Belkina N. A. Chemical composition of bottom sediments of Lake Onega, Sostoyanie vodnyh ob'ektov respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1998–2006 gg., Red. P. A. Lozovik. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 2007. P. 40–48.
- Belkina N. A. Internal phosphorus load in Lake Onega, Krupneye ozera-vodohranilischa Severo-Zapada evropeyskoy territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticheskikh i antropogennyh vozdeystviyah, Pod red. N. N. Filatova. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 2015a. P. 95–103.
- Belkina N. A. Phosphorus in the bottom sediments of Lake Onega, Izvestiya Rossiyskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta imeni A. I. Gercena. 2015b. No. 173. P. 97–109.
- Belkina N. A. Pollution of bottom sediments of Petrozavodskaya bay of Lake Onega by oil, Vodnye resursy. 2006. T. 33. No. 2. P. 181–187.
- Belkina N. A. Retrospective assessment of bottom sediments of Kondopozhskaya bay of Lake Onega, Vodnye resursy. 2005. T. 32. No. 6. P. 689–699.
- Belkina N. A. Role of sediment in the processes of transformation of organic matter and nutrients in the lake ecosystems, Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. Vodnye problemy Severa i puti ih resheniya. 2011. No. 4. P. 35–41.
- Belkina N. A. The change in the oxidation-reduction state of lake bottom sediments under the influence of anthropogenic factors (on the example of the Ladoga and Onega lakes), Obschestvo. Sreda. Razvitiye 2014. No. 3. P. 152–158.
- Borodulina G. S., Belkina N. A. Study of the geochemical anomalies at the water-sediment boundary in subaqueous groundwater discharge zones in lake Onega, Book of abstract. 32nd congress of the international society of limnology. Budapest. August 4–9. Budapest, 2013. P. 191.
- Filatov N. N. Georgiev A. P. Efremova T. V. Nazarova L. E. Pal'shin N. I. Ruhovec L. A. Tolstikov A. V. Sharov A. N. The reaction of the lakes of Eastern Fennoscandia and East Antarctica to climate change, Doklady Akademii nauk. 2012. T. 444. No. 5. P. 554–557.
- Filatov N. N. Ruhovec L. A. Nazarova L. E. Georgiev A. P. Efremova T. V. Pal'shin N. I. The impact of climate change on the lakes ecosystems of the Northern European territory of Russia, Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. 2014. No. 34. P. 48–55.
- Georgiev A. P. Nazarova L. E. The transformation of the fish fauna in freshwater ecosystems of the Republic of Karelia in the conditions of climate variability, Ekologiya. 2015. No. 4. P. 272–279.
- Guidelines for chemical analysis of surface waters. Ch. 1, Pod. red. L. V. Boevoy. Rostov n/D: NOK, 2009. 104 p.
- Guidelines for the sampling and processing of materials in hydrobiological research on freshwater ecosystems. Zoobenthos and its production. L., 1984. 52 p.
- Guidelines for the sampling and processing of materials in the biological monitoring of pollution in the Gulf of Finland, Pod red. A. F. Alimova, T. M. Florinskoy. SPb., 2005. 68 p.
- Hakanson L., Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin, 1983. 316 p.
- Kalinkina N. M. Belkina N. A. Sidorova A. I. Galibina N. A. Nikerova K. M. Bioassay of bottom sediments toxicity in Lake Onega, with regard to their chemical composition and deepwater macrozoobenthos state, Principy ekologii, 2017b. T. 6. No. 1. P. 25–55. DOI: [10.15393/j1.art.2017.6022](https://doi.org/10.15393/j1.art.2017.6022).
- Kalinkina N. M. Belkina N. A. Sidorova A. I. Biogeochemical approaches to assessing the bottom communities condition of Lake Onega, Bioindikaciya i monitoring presnovodnyh ekosistem III: Materialy mezhdunarodnoy konferencii, Pod red V. A. Rumyanceva, I. P. Trifonovoy. SPb.: Svoe izdatel'stvo, 2017a. P. 134–137.
- Kalinkina N. M. Sidorova A. I. Polyakova T. N. Belkina N. A. Berezina N. A. Litvinova I. A. Decrease in the deepwater benthic communities abundance in Lake Onega under multifactor influence, Principy ekologii. 2016. T. 5. No. 2. P. 47–68. DOI: [10.15393/j1.art.2016.5Lake182](https://doi.org/10.15393/j1.art.2016.5Lake182).
- Kalyuzhnny I. L. Lavrov S. A. Hydrophysical processes in the catchment area: experimental research and modeling. SPb: Nestor-Istoriya, 2012. 616 p.
- Kamlyuk L. V. Energy metabolism in free flat and annelid worms and its determining factors, Zhurnal obshchey biologii. 1974. T. 35. No. 6. P. 847–885.
- Kuharev V. I. Polyakova T. N. On the approximate evaluation of the production of zoobenthos in Karelian reservoirs under environmental studies, Pritoki Onezhskogo ozera. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC

- RAN, 1990. P. 127–141.
- Lake Onega. Atlas, Otv. red. N. N. Filatov. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2010. 151 p.
- Mass concentration of phosphates and polyphosphates in water. Method of measurement by photometric method. Rostov n/D, 2006.
- Nazarova L. E. Long-term changes in air temperature in Karelia, Geografiya i prirodnye resursy. 2008. No. 3. P. 75–79.
- Nazarova L. E. Precipitation in Karelia, Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN. 2015. No. 9. P. 114–120.
- Orlov D. S. Grishina L. A. Eroshicheva N. L. Workshop on biochemistry of humus. M.: MGU, 1969. 157 p.
- Perova S. N. Changes in the structure and abundance of the macrozoobenthos of the Volga Reach of the Rybinsk Reservoir during the warming period, Bioindikaciya i monitoring presnovodnyh ekosistem III: Materialy mezhdunarodnoy konferencii, Pod red V. A. Rumyanceva, I. P. Trifonovoy. SPb.: Svoe izdatel'stvo, 2017. P. 248–251.
- Polyakova T. N. Macrozoobenthos, Krupneye ozera-vodohranilischa Severo-Zapada evropeyskoy territorii Rossii: sovremennoe sostoyanie i izmeneniya ekosistem pri klimaticeskikh i antropogennyh vozdeystviyah, Pod red. N. N. Filatova, N. M. Kalinkinoy, T. P. Kulikovoy, A. V. Litvinenko, P. A. Lozovika. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2015. P. 127–133.
- Polyakova T.N. Bottom cenoses under anthropogenic eutrophication, Onezhskoe ozero. Ekologicheskie problemy. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 1999. C. 211–227.
- Quantitative chemical analysis of water. Method for measuring the mass concentrations of cobalt, nickel, copper, zinc, chromium, manganese, iron, silver, cadmium and lead in drinking, natural and waste water samples by atomic absorption spectroscopyM., 1998.
- Strahovenko V. D. Ovdina E. A. Danilenko I. V. Subetto D. A. Belkina N. A. Efremenko N. A. Mineralogical-geochemical characteristics of modern sedimentogenesis process in Lake Onega, Ozera Evrazii: problemy i puti ikh resheniya: Materialy 1-iy Mezhdunarodnoy konferencii (11–15 sentyabrya 2017 g.). Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy centr RAN, 2017. P. 418–425.
- Suschenya L. M. Quantitative patterns of crustaceans nutrition. Minsk: Nauka i tehnika, 1975. 208 p.
- Suschenya L. M. Respiration rate of crustaceans. Kiev: Naukova dumka, 1972. 196 p.
- Vasil'eva E. P. Bottom sediments, Ekosistema Onezhskogo ozera i tendencii ee izmeneniya. L.: Nauka, 1990. P. 147–175.
- Vasil'eva E. P. Chemical composition of bottom sediments of Lake Onega, Sovremennoe sostoyanie vodnyh ob'ektor respubliki Kareliya. Po rezul'tatam monitoringa 1992–1997 gg. Petrozavodsk: Izd-vo KarNC RAN, 1998. P. 52–54.
- Vasil'eva E. P. Features of the formation of the sediments chemical composition in Kondopozhskaya Bay, Limnologiya Kondopozhskoy guby Onezhskogo ozera. Petrozavodsk, 1986. P. 36–47.
- Vuori K, M. Direct and indirect effects of iron on river ecosystems, Ann. Zool. Fennici. 1995. No. 32. R. 317–329.
- Zaika V. E. Specific production of aquatic invertebrates. Kiev: Naukova dumka, 1972. 144 p.