

УДК 574.5

МАКРОЗООБЕНТОС ГУБЫ МОЛОЧНОЙ (ОЗЕРО ИМАНДРА) ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ТОВАРНОЙ ФОРЕЛИ

Е. С. Савосин, Д. С. Савосин*

*Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *sadenser@inbox.ru*

Объектом данного исследования является озеро Имандра – крупнейший водоем Мурманской области. Водоем расположен в районе с развитой промышленностью и испытывает антропогенную нагрузку, выражающуюся в термофикации и биогенном загрязнении. Кроме того, значителен вклад поступления коммунально-бытовых вод крупных населенных пунктов, расположенных на территории его водосбора. Увеличение количества биогенных элементов в водной среде способно привести к эвтрофированию водоема в процессе антропогенной трансформации. В ходе исследования оценивалось экологическое состояние участка акватории губы Молочной озера Имандра по ряду показателей сообществ зообентоса, а также проводилось сравнение полученных данных с результатами предыдущих исследований. Анализ характеристик донного гидробиоценоза в зоне выращивания молоди форели выявил доминирование в водоеме комплекса *Oligochaeta+Chironomidae*, формирующих более 90 % биомассы и численности в пробе. Изучение современного состояния сообщества макрозообентоса губы проводилось с использованием общепринятых методов. Индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера (H) для исследованного водоема варьировал от 1,14 до 1,42 и в среднем составил $1,32 \pm 0,16$, что свидетельствует о незначительном видовом обилии донных организмов и сложившейся структуре доминирующих таксонов. По уровню количественного развития зообентоса исследованный район акватории относится к α -мезотрофным, по индексу сапробности – к β -мезосапробным. Полученные результаты могут служить основой для комплексного экологического мониторинга водоемов Арктической зоны РФ с развитым форелеводством.

Ключевые слова: макрозообентос; Арктическая зона Российской Федерации; антропогенное воздействие; арктическая биота; аквакультура; биоразнообразие; биомониторинг; донные отложения; Имандра

Для цитирования: Савосин Е. С., Савосин Д. С. Макрозообентос губы Молочной (озеро Имандра) при выращивании товарной форели // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 4. С. 79–88. doi: 10.17076/lim2220

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Институт биологии КарНЦ РАН, FMEN-2022-2007).

E. S. Savosin, D. S. Savosin*. MACROZOOBENTHOS OF MOLOCHNAYA BAY (LAKE IMANDRA) WITH COMMERCIAL TROUT FARMING

*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *sadenser@inbox.ru*

The study focused on Lake Imandra – the largest body of water in the Murmansk Region. Situated in a heavily industrialized area, the lake experiences anthropogenic pressures, including thermal degradation and nutrient pollution. Furthermore, it receives significant amounts of municipal wastewater from large settlements within its catchment area. Increased nutrient levels in the aquatic environment can lead to eutrophication of the lake during its anthropogenic transformation. The aim of the study was to assess the ecological state of the Molochnaya Bay area of Lake Imandra using a number of zoobenthos community parameters, and to compare these data with the results of previous studies. Analysis of the characteristics of the benthic community in the juvenile trout rearing area revealed a dominance of the Oligochaeta + Chironomidae complex, which accounts for over 90% of the sample biomass and abundance. The current state of the bay's macrozoobenthos community was studied using commonly accepted methods. The Shannon-Weaver species diversity index (H) for the studied reservoir ranged from 1.14 to 1.42, averaging 1.32 ± 0.16 , indicating a low species abundance of benthic organisms and an established structure of dominant taxa. In terms of zoobenthos quantities, the studied area is classified as α -mesotrophic, and its saprobity index is β -mesosaprobic. These results can serve as a basis for integrated environmental monitoring of water bodies with active trout farming in the Arctic zone of the Russian Federation.

Keywords: macrozoobenthos; Arctic Zone of Russia; human impact; Arctic biota; aquaculture; biodiversity; biomonitoring; sediments; Imandra

For citation: Savosin E. S., Savosin D. S. Macrozoobenthos of Molochnaya Bay (Lake Imandra) with commercial trout farming. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 4. P. 79–88. doi: 10.17076/lim2220

Funding. The study was financed from the Russian federal budget through state assignment to KarRC RAS (Institute of Biology KarRC RAS, FMEN-2022-2007).

Введение

В современный период многие водоемы подвержены влиянию антропогенных факторов (загрязнение среды на всех уровнях, накопление поллютантов, нарушение почвенно-растительного покрова, браконьерство, нерациональное использование биоресурсов, внедрение чужеродных видов) [Тишков, 2012]. Наблюдаемые изменения климата дополнительно усиливают негативные процессы, протекающие в водных экосистемах [Solomon et al., 2015; Roberts et al., 2017]. Оценка современного состояния всех элементов биоты, изучение видового состава, количественных характеристик биоценозов, в частности донной фауны, является актуальной задачей в решении проблемы сохранения биоразнообразия как важнейшего показателя состояния экосистемы [Sala et al., 2000; Arctic..., 2013; Culp et al., 2021].

Известно, что природа Крайнего Севера весьма уязвима к внешним воздействиям и обладает низким потенциалом самоочищения

[Моисеенко, Яковлев, 1990; Кашулин и др., 2019]. Эвтрофирование пресноводных и прибрежных морских экосистем в результате увеличения антропогенной нагрузки биогенными элементами в последние десятилетия стало глобальной проблемой и представляет серьезную угрозу устойчивости, экологической целостности и безопасному использованию внутренних и прибрежных вод [Моисеенко и др., 2009; Александров, 2010; Биота..., 2012].

Экологический мониторинг пресноводных водоемов требует надежных индикаторов, способных отражать долгосрочные изменения в экосистеме. Для комплексной оценки состояния водоемов исследователи используют биоиндикацию – метод, основанный на наблюдении за живыми организмами-маркерами. Одним из наиболее информативных объектов является бентос. Организмы донной фауны характеризуются широким экологическим спектром, достаточно крупными размерами, приуроченностью к конкретному местообитанию, значительной продолжительностью жизни,

позволяющей им аккумулировать загрязняющие вещества. Все это делает их очень удобным объектом для мониторинга пресноводных экосистем [Баканов, 2000; Яковлев, 2005].

Цель работы – оценка экологического состояния участка акватории губы Молочной озера Имандра по ряду показателей сообществ зообентоса и сравнение полученных данных с результатами предыдущих исследований.

Материалы и методы

Озеро Имандра – самый крупный водоем Кольского полуострова общей площадью 880,5 км². Оно характеризуется сложной лопастной формой с большим количеством заливов. Выделяют три в значительной степени обособленных плеса озера: Большая, Йокостровская и Бабинская Имандра.

Изучение зообентоса Мурманской области на примере крупных озер – Имандры и Умбозера началось в 1925–1930 гг. [Валькова и др., 2012], в дальнейшем эти работы носили эпизодический характер и выполнялись на отдельных плесах. Начиная с 1930-х годов в районе оз. Имандра происходит интенсивное строительство предприятий различных отраслей промышленности – горнодобывающей, химической, обогатительной, что привело к появлению новых городов, поселков и возрастанию численности населения – более 300 тыс. человек в настоящее время [Моисеенко и др., 2009; Кашулин и др., 2018а; Даувальтер и др., 2023]. Систематические гидробиологические исследования оз. Имандра получили развитие в конце 1980-х гг. на базе Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН) [Яковлев, 1984, 1998, 2005; Валькова, Кашулин, 2013].

Объектом исследования выбрана губа Молочная, входящая в состав Бабинской Имандры (южная часть водоема); в нее поступают подогретые сбросные воды Кольской АЭС, содержащие тяжелые металлы и ряд других химически активных веществ, а также биогены от функционирующей форелевой фермы [Анохина и др., 2016; Терентьева и др., 2017; Волкова, Хуобонен, 2019].

Изучение гидробиоценозов в губе Молочной оз. Имандра (рис. 1) проводилось в рамках комплексного исследования сотрудниками Института биологии КарНЦ РАН летом 2020 года при колебаниях температуры воды 18–23 °С. Для количественного отбора проб зообентоса в двух повторностях использовался дночерпатель Экмана-Берджа (площадь захвата 0,025 м²). Грунт промывался через сито

(размер ячеек 0,5 мм) и фиксировался в 8%-м растворе формалина [Абакумов, 1983]. Станции отбора проб (4) располагались в зоне постановки форелевых садков. Преобладающими типами грунта были илистые и илисто-песчаные. Всего в 2020 году отобрано 8 проб. Глубина варьировала от 3 до 5 м.

Камеральные процедуры проводились в лаборатории с использованием бинокулярного микроскопа Micromed MC-2-ZOOM, беспозвоночные сортировались по таксономическим группам и взвешивались на весах DA-124C (BEL Engineering) с точностью до 0,1 мг. Виды классифицировались в соответствии с последними рекомендациями [Timm, 2009; Определитель..., 2016] информационных порталов GBIF.org и Fauna Europea [De Jong et al., 2014]. Трофический статус водоема определялся по шкале С. П. Китаева [2007]. Для оценки видовой разнообразия на станциях с помощью программы PAST 3.18 рассчитывался индекс Шеннона (H) [Hammer et al., 2001; Magurran, 2013]. Кроме того, рассчитывался индекс сапробности (по методике Пантле и Букка в модификации Сладечека) с использованием индикаторных организмов макрозообентоса [Вшивкова и др., 2019]. Для оценки степени загрязнения вод Имандры использовался хирономидный индекс (K), предложенный Е. В. Балушкиной [1997].

Полученные данные сравнивали с результатами более ранних исследований на основе архивных данных (около 50 проб) ИППЭС КНЦ РАН.

Результаты

В ходе исследования в донном сообществе отмечены 15 таксонов надвидового и видового ранга водных беспозвоночных. Из них Oligochaeta – 3, Chironomidae – 10 (табл. 1).

Доминирующий комплекс зообентоса формируют Chironomidae (*Chironomus anthracinus* Zetterstedt, 1860, *Procladius* sp., *Microtendipes pedellus* De Geer, 1776.), Oligochaeta (*Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede, 1862, *Tubifex tubifex* Muller, 1774). В составе зообентоса озера также отмечены представители моллюсков и нематод (Bivalvia, Nematoda) на илисто-песчаных грунтах. Более 60 % таксонов беспозвоночных в составе бентоса представлено личинками насекомых. Значения биомассы (B) исследованных организмов по станциям варьировали от 3,37 до 9,62 г/м², численности (N) – от 880 до 3820 экз./м². Величина средней биомассы макрозообентоса в летний период 2020 г. составила 5,79 г/м², численность – около 2400 экз./м² (табл. 2). Основу биомассы формировали Chironomidae – 4,93 г/м² при численности 1625 экз./м².

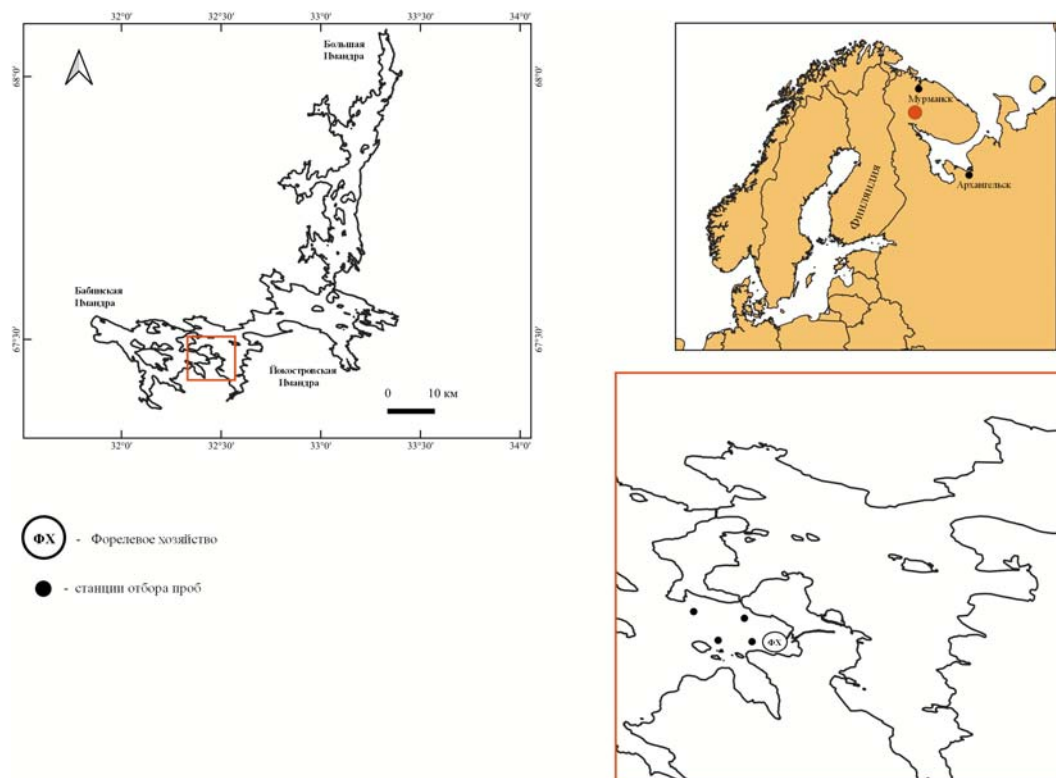


Рис. 1. Картосхема района исследования в губе Молочной (Бабинская Имандра)

Fig. 1. Schematic map of the study area in Molochnaya Bay (Babinskaya Imandra)

Таблица 1. Список видов макрозообентоса в оз. Имандра в районе исследования

Table 1. List of macrozoobenthos species in Lake Imandra in the study area

Таксон Taxon	Станции Station			
	1	2	3	4
Класс / Class Oligochaeta				
<i>Tubifex tubifex</i> (Müller, 1774)	++	++	++	++
<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparède, 1862	++	++	++	++
<i>Spirosperma ferox</i> Eisen, 1879	–	–	–	+
Класс / Class Nematoda				
<i>Nematoda</i> spp.	+	+	+	–
Класс / Class Insecta				
Отряд / Order Diptera				
Семейство / Family Chironomidae				
<i>Monodiamesa bathyphila</i> Kieffer, 1918	+	+	–	–
<i>Prodiamesa olivacea</i> Meigen, 1818	+	+	+	–
<i>Tanytarsus gregarius</i> Kieffer, 1909	+	–	–	+
<i>T. bathophilus</i> Kieffer, 1911	+	–	–	+
<i>Microtendipes pedellus</i> (De Geer, 1776)	+++	+++	+++	+++
<i>Polypedilum nubeculosum</i> (Meigen, 1804)	+	–	–	–
<i>Stictochironomus crassiforceps</i> (Kieffer, 1922)	–	–	–	++
<i>Chironomus anthracinus</i> Zetterstedt, 1860	++	+++	+++	–
<i>Chironomus</i> sp.	+++	++	–	++
<i>Procladius</i> sp.	+	++	++	+
Класс / Class Bivalvia				
<i>Pisidium</i> sp.	+	–	–	+

Примечание. (+++) – доминант по численности, (++) – субдоминант, (+) – единичные находки, (–) – отсутствие вида.

Note. (+++) – dominant in number, (++) – subdominant, (+) – single findings, (–) – absence of species.

Таблица 2. Средняя численность и биомасса макрозообентоса оз. Имандра в районе постановки садков (2020 г.)

Table 2. Average abundance and biomass of macrozoobenthos of Lake Imandra in the area of cage installation (2020)

Таксоны / Taxon	N, экз./м ² N, spec./m ²	ДИ	N, %	B, г/м ² B, g/m ²	ДИ	B, %	F, %
Chironomidae	1625 ± 65	1582–1700	69,35	4,93 ± 0,19	67–72	85,14	100,00
Oligochaeta	615 ± 31	598–631	26,25	0,75 ± 0,03	25–27	12,95	100,00
Bivalvia	30 ± 1,2	29–31	1,28	0,1 ± 0,013	1,25–1,31	1,71	50,00
Nematoda	73 ± 4,38	71–75	3,12	0,01 ± 0,004	3,03–3,21	0,20	75,00
Total	2343		100	5,79		100	-

Примечание. N – средняя численность (приведена со значениями стандартной ошибки); N, % – относительная численность; B – средняя биомасса (приведена со значениями стандартной ошибки); B, % – относительная биомасса; F, % – встречаемость таксонов от общего числа проб; ДИ – доверительный интервал (95 %).

Note. N – average abundance (given with standard error); N, % – relative abundance; B – average biomass (given with standard error); B, % – relative biomass; F, % – occurrence of taxa from the total number of samples; ДИ – confidence interval (95 %).

По результатам наших исследований отмечены пиковые значения для донной фауны в условиях комплексного воздействия сразу нескольких факторов – АЭС и форелевого хозяйства. В зоне отбора проб рядом с садками

зарегистрированы превышающие средние по Молочной губе и в целом по водоему значения биомассы (5,79 г/м²) и численности (2343 экз./м²) макрозообентоса (рис. 2, 95% ДИ: 2281–2404).

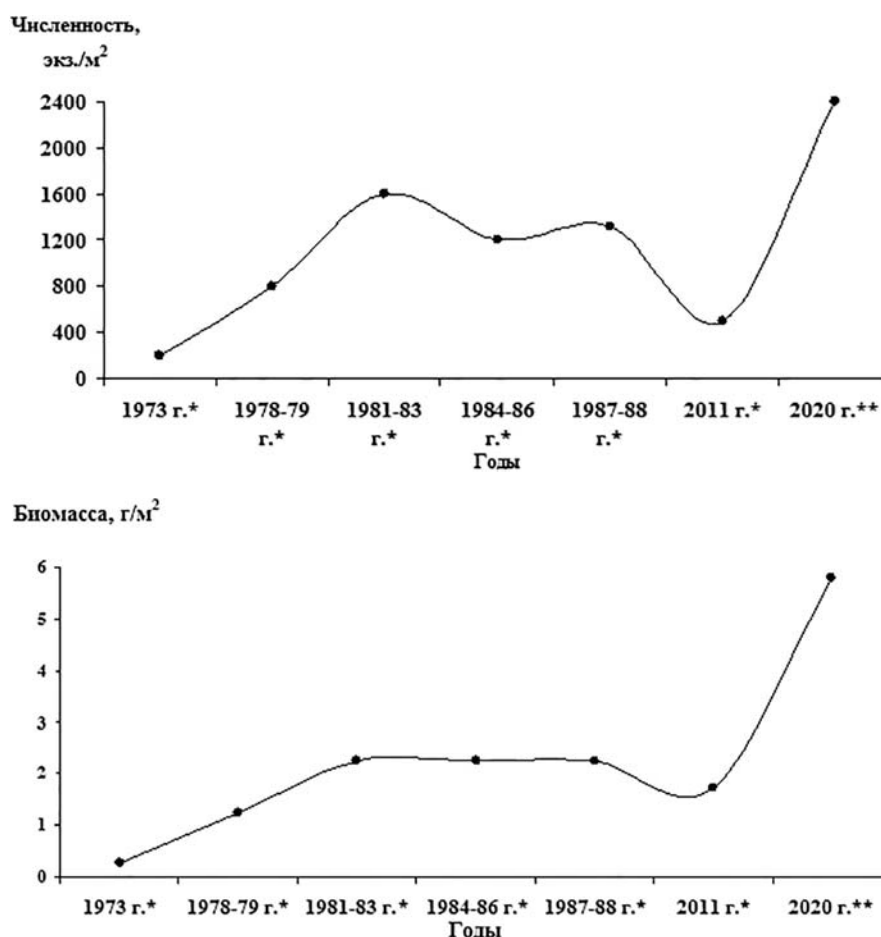


Рис. 2. Численность и биомасса макрозообентоса Молочной губы оз. Имандра в разные годы (*архивные данные, **наши данные)

Fig. 2. Abundance and biomass of macrozoobenthos of Molochnaya Bay of Lake Imandra in different years (*archival data, **authors' data)

Индекс видового разнообразия Шеннона – Уивера (H) для исследованного водоема варьировал от 1,14 до 1,42, в среднем он составил $1,32 \pm 0,16$, что свидетельствует о незначительном видовом обилии донных организмов и сложившейся структуре доминирующих таксонов. Олигохетный индекс Гуднайта – Уитлея (OI = 38,6 %), основанный на соотношении численности олигохет и общей численности всех организмов макрозообентоса, позволяет отнести водоем к 2–3 классу качества вод. Согласно показателю индекса сапробности Пантле – Букка (S = 2,93), полученному с использованием 7 таксонов макрозообентоса (видов-индикаторов), водоем относится к α -мезосапробному типу. По шкале трофности Имандра соответствует β -мезотрофным водоемам.

Обсуждение

Озеро Имандра долгое время испытывает воздействие антропогенного фактора вследствие развитой промышленности региона, что значительно влияет на качество вод и донных отложений. По результатам исследований района Бабинской Имандры, испытывающего влияние подогретых вод Кольской АЭС, прослеживалась относительно стабильная динамика количественных показателей [Валькова, Кашулин, 2013].

Одним из новых факторов, оказывающих влияние на губу, служит действующее с 2014 года садковое рыболовное хозяйство. Как правило, культивирование рыб сопровождается внесением в водоем повышенного количества биогенов вследствие кормления и процессов метаболизма у гидробионтов. Многочисленные исследования подтверждают негативный для экологического состояния водной среды эффект в районах форелеводства [Анохина и др., 2016; Стерлигова и др., 2018].

В структуре руководящего комплекса донной фауны по результатам научных изысканий более ранних лет в период 1973–1978 гг. основу бентоса (до 80 % численности и 60 % биомассы) формировали олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri*. По данным 2011 года около 50 % всех видов и форм зообентоса приходилось на представителей семейства Chironomidae, показатели общей численности и биомассы макрозообентоса составили 1915 экз./м² и 1,8 г/м² [Валькова, Кашулин, 2013].

Следует заметить, что для илистых субстратов в разные годы отмечали повышенные количественные показатели макробеспозвоночных, в основном за счет массового развития крупных личинок хирономид рода *Chironomus*.

Многолетние исследования макрозообентоса губы Молочной выявили, что в последние годы численность и биомасса бентофауны растут. По результатам предыдущих работ, содержание биогенов в данном районе имеет колебательный характер с выраженной межгодовой и сезонной изменчивостью, с пиком в зимний период [Моисеенко, Яковлев, 1990; Антропогенные..., 2002; Кашулин и др., 2018б; Даувальтер и др., 2023]. Кроме того, отмечено повышенное содержание ионов аммония в зоне влияния рыболовного хозяйства, что напрямую свидетельствует об активных процессах первичного разложения органических остатков в придонном слое и на мягких субстратах под садками [Анохина и др., 2016].

Сопоставление архивных данных и наших исследований показало, что длительный период наблюдалась стабильность в составе доминирующих групп макрозообентоса в существующих условиях [Моисеенко, Яковлев, 1990; Валькова, Кашулин, 2013; Кашулин и др., 2018б; Moiseenko, Sharov, 2019]. Одним из постоянных компонентов бентоценоза в губе Молочной является амфипода *Monoporeia affinis* [Моисеенко и др., 2009; Валькова, Кашулин, 2013; Moiseenko, Sharov, 2019]. В наших исследованиях данный вид не был представлен, что, по всей видимости, связано с биологическими особенностями реликта и условиями биотопов, в которых отбирались пробы.

Исследования антропогенно нарушенных водоемов (в т. ч. озера Имандра) выявили рост численности зообентоса при одновременном снижении видового обилия. Как правило, формировалось сообщество из хирономид (*Chironomus*, *Procladius*), круглых червей (*Nematoda*), малощетинковых червей (*Tubifex tubifex*, *Limnodrilus hoffmeisteri*) с высокой численностью и скудным списком видов. За счет высоких концентраций биогенных элементов и высокой толерантности к комплексному загрязнению в донных сообществах увеличивалась доля эврибионтных видов [Moiseenko, Sharov, 2019; Современное..., 2021; Палеоолимология..., 2022; Даувальтер и др., 2023].

Для озер тундровой, лесотундровой и таежной зон характерно низкое природное содержание органического вещества и биогенных элементов, что позволяет говорить об их олиготрофии. Однако факторы урбанизации и экологической нагрузки от различных типов промышленности в импактных зонах ведут к обогащению вод биогенными и органическими веществами, трансформируя трофический статус водоемов [Моисеенко и др., 2009].

Заключение

Комплексное исследование сообщества макрозообентоса губы Молочной озера Имандра выявило устойчивую негативную динамику экосистемы, обусловленную многолетней (свыше 60 лет) антропогенной нагрузкой различного генезиса.

Для зообентоса исследованного района характерно снижение таксономического разнообразия донной фауны с доминированием толерантных к загрязнению таксонов в условиях β -мезотрофии, что отражает умеренное обогащение биогенными элементами. Следует отметить, что сохранение доминирующих таксонов не отражает здоровье экосистемы, а является, по всей видимости, результатом их адаптации к стрессовым условиям.

Для рационального использования арктических водоемов с развитым рыболовством необходимо проводить регулярный мониторинг зообентоса как чувствительного индикатора состояния водной среды.

Литература

- Абакумов В. А. Руководство по методам гидро-биологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 21–33.
- Анохина В. С., Кравец П. П., Малавенда С. С., Приймак П. Г., Тюкина О. С. Оценка экологического состояния губы Молочной озера Имандра в зоне акватории // *Известия КГТУ*. 2016. № 42. С. 11–29.
- Александров С. В. Влияние климатических изменений на уровень эвтрофирования Куршского залива // *Вестник Рос. гос. ун-та им. И. Канта*. 2010. Вып. 1. С. 49–57.
- Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра / Отв. ред. Т. И. Моисеенко. М.: Наука, 2002. 487 с.
- Баканов А. И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов (обзор) // *Биология внутренних вод*. 2000. № 1. С. 68–82.
- Балушкина Е. В. Применение интегрального показателя для оценки качества вод по структурным характеристикам донных сообществ // *Реакция озерных экосистем на изменение биотических и абиотических условий*. СПб.: ЗИН РАН, 1997. С. 266–292.
- Биота северных озер в условиях антропогенного воздействия / Ред. Н. Н. Немова, Н. В. Ильмаст, Е. П. Иешко, О. В. Мещерякова. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 230 с.
- Валькова С. А., Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Сандимиров С. С. Структура и динамика сообществ зообентоса озера Имандра в зоне влияния медно-никелевого комбината // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2012. Вып. 2. С. 22–39.
- Валькова С. А., Кашулин Н. А. Особенности структуры и функционирования бентосных сообществ в условиях теплового загрязнения // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2013. № 3(16). С. 97–105.
- Волкова А. Ю., Хуобонен М. Э. Оценка морфометрических и рыболовно-биологических показателей сибирского осетра (*Acipenser baerii* Brandt) ленской популяции при выращивании в условиях Крайнего Севера // *Вестник МГТУ*. 2019. Т. 22, № 2. С. 243–248. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-243-248
- Вшивкова Т. С., Иваненко Н. В., Якименко Л. В., Дроздов К. А. Введение в биомониторинг пресных вод. Владивосток: ВГУЭС, 2019. 239 с.
- Даувальтер В. А., Сандимиров С. С., Денисов Д. Б., Демин В. И., Кашулин Н. А., Терентьев П. М., Валькова С. А., Вандыш О. И., Королева И. М., Кудрявцева Л. П., Зубова Е. М., Петрова О. В., Черепанов А. А. Экологическое состояние озера Имандра. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 221 с.
- Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Скуфьина Т. П., Котельников В. А. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения // *Арктика: экология и экономика*. 2018а. № 4(32). С. 15–29. doi: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29
- Кашулин Н. А., Даувальтер В. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М., Зубова Е. М., Королева И. М., Косова А. Л., Черепанов А. А. Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018б. Т. 9. № 9-6. С. 34–86. doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86
- Кашулин Н. А., Беккелунд А., Даувальтер В. А., Петрова О. В. Апатитовое горно-обогачительное производство и эвтрофирование арктического озера Имандра // *Арктика: экология и экономика*. 2019. № 3(35). С. 16–34. doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34
- Китаев С. П. Основы лимнологии для гидро-биологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 390 с.
- Моисеенко Т. И., Яковлев В. А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. 220 с.
- Моисеенко Т. И., Гашкина Н. А., Шаров А. Н., Вандыш О. И., Кудрявцева Л. П. Антропогенная трансформация арктической экосистемы озера Имандра: тенденции к восстановлению после длительного периода загрязнения // *Водные ресурсы*. 2009. Т. 36, № 3. С. 312–325.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос / Под ред. В. Р. Алексеева, С. Я. Цаллолихина. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2016. 457 с.
- Палеолимнология Онежского озера: от приледникового озера к современным условиям / Отв. ред. Д. А. Субетто. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2022. 331 с. doi: 10.17076/m-onegoraleo23
- Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Под ред. С. А. Кондратьева, Ш. Р. Позднякова, В. А. Румянцова. М.: РАН, 2021. 637 с. doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- Стерлигова О. П., Ильмаст Н. В., Кучко Я. А., Комулайнен С. Ф., Савосин Е. С., Барышев И. А.

Состояние пресноводных водоемов Карелии с товарным выращиванием радужной форели в садках. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 127 с.

Терентьева И. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Оценка трофического статуса субарктического озера Имандра // Вестник МГТУ. 2017. Vol. 20(1-2). С. 197–204. doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-197-204

Тишков А. А. «Арктический вектор» в сохранении наземных экосистем и биоразнообразия // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 28–43.

Яковлев В. А. Методы оценки качества вод по зообентосу озера Имандра // Мониторинг природной среды Кольского Севера. Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1984. С. 39–50.

Яковлев В. А. Пресноводный зообентос Северной Фенноскандии (разнообразие и антропогенная динамика). Апатиты: КНЦ РАН, 2005. Ч. 1. 161 с.

Яковлев В. А. Реакция зоопланктона и зообентоса на изменение качества воды субарктического водоема (на примере оз. Имандра) // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 6. С. 715–723.

Arctic biodiversity assessment: Status and trends in Arctic biodiversity – Conservation of Arctic Flora and Fauna / Eds. H. H. Meltre, A. B. Josefson. Denmark: Narayana Press, 2013. 674 p.

Culp J. M., Goedkoop W., Christensen T., Christoffersen K. S., Fefilova E., Liljaniemi P., Novichkova A. A., Ólafsson J. S., Sandøy S., Zimmerman Ch. E., Lento J. Arctic freshwater biodiversity: establishing baselines, trends, and drivers of ecological change // Freshwater Biology. 2022. Vol. 67. P. 1–13. doi: 10.1111/fwb.13831

de Jong Y., Verbeek M., Michelsen V., de Place Bjørn P., Los W., Steeman F., Bailly N., Basire C., Chylarecki P., Stloukal E., Hagedorn G., Wetzel F. T., Glöckler F., Kroupa A., Korb G., Hoffmann A., Häuser Ch., Kohlbecker A., Müller A., Güntsch A., Stoev P., Penev L. Fauna Europaea – all European animal species on the web // Biodivers. Data J. 2014. Vol. 2. e4034. doi: 10.3897/BDJ.2.e4034

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. 9 p.

Magurran A. E. Ecological diversity and its measurement. Netherlands: Springer, 2013. 181 p. doi: 10.1007/978-94-015-7358-0

Moiseenko T., Sharov A. Large Russian Lakes Ladooga, Onega, and Imandra under strong pollution and in the period of revitalization: a review // Geosciences. 2019. Vol. 9(12). Art. 492. doi: 10.3390/geosciences9120492

Roberts K. E., Lamoureux S. F., Kyser T. K., Muir D. C. G., Lafrenière M. J., Iqaluk D., Pieńkowski A. J., Normandeau A. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of high Arctic Lakes // Scientific Reports. 2017. Vol. 7. Art. 13292. doi: 10.1038/s41598-017-13658-9

Sala O. E., Chapin F. S., Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Hueneke L. F., Jackson R. B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D. M., Mooney H. A., Oesterheld M., Poff N. L., Sykes M. T., Walker B. H., Walker M., Wall D. H. Global biodiversity scenarios for the year 2100 // Science. 2000. Vol. 287. P. 1770. doi: 10.1126/science.287.5459.1770

Solomon C. T., Jones S. E., Weidel B. C., Buffam I., Fork M. L., Karlsson J., Larsen S., Lennon J. T., Read J. S., Sadro S., Saros J. E. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges // Ecosystems. 2015. Vol. 18. P. 376–389. doi: 10.1007/s10021-015-9848-y

Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe // Lauterbornia. 2009. Vol. 66. P. 1–235.

References

Abakumov V. A. Guidelines for methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. P. 21–33. (In Russ.)

Alekseev V. R., Tsalolikhin S. Ya. (eds.). A key to zooplankton and zoobenthos of fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos. Moscow: KMK; 2016. 457 p. (In Russ.)

Aleksandrov S. V. Influence of climate changes on the level of eutrophication of the Curonian Lagoon. Vestnik Ros. gos. un-ta im. I. Kanta = Bulletin of Immanuel Kant Russian State University. 2010;1:49–57. (In Russ.)

Anokhina V. S., Kravets P. P., Malavenda S. S., Priimak P. G., Tyukina O. S. Assessment of the ecological state of Molochnaya Bay of Lake Imandra in the aquaculture zone. Izvestiya KGTU = Proceedings of Kaliningrad State Technical University. 2016;42:11–29. (In Russ.)

Bakanov A. I. Use of zoobenthos for monitoring freshwater bodies (a review). Biologiya vnutrennikh vod = Inland Water Biology. 2000;1:68–82. (In Russ.)

Balushkina E. V. Application of an integral indicator for assessing water quality by structural characteristics of bottom communities. Reaktsiya ozernykh ekosistem na izmenenie bioticheskikh i abioticheskikh uslovii = Response of lake ecosystems to changes in biotic and abiotic conditions. St. Petersburg: ZIN RAN; 1997. P. 266–292. (In Russ.)

Culp J. M., Goedkoop W., Christensen T., Christoffersen K. S., Fefilova E., Liljaniemi P., Novichkova A. A., Ólafsson J. S., Sandøy S., Zimmerman Ch. E., Lento J. Arctic freshwater biodiversity: establishing baselines, trends, and drivers of ecological change. Freshwater Biology. 2022;67:1–13. doi: 10.1111/fwb.13831

Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S., Denisov D. B., Demin V. I., Kashulin N. A., Terent'ev P. M., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Koroleva I. M., Kudryavtseva L. P., Zubova E. M., Petrova O. V., Cherepanov A. A. Ecological state of Lake Imandra. Apatity: KSC RAS; 2023. 221 p. (In Russ.)

de Jong Y., Verbeek M., Michelsen V., de Place Bjørn P., Los W., Steeman F., Bailly N., Basire C., Chylarecki P., Stloukal E., Hagedorn G., Wetzel F. T., Glöckler F., Kroupa A., Korb G., Hoffmann A., Häuser Ch., Kohlbecker A., Müller A., Güntsch A., Stoev P., Penev L. Fauna Europaea – all European animal species on the web. Biodivers. Data J. 2014;2:e4034. doi: 10.3897/BDJ.2.e4034

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4. 9 p.

- Nemova N. N., Il'mast N. V., Ieshko E. P., Meshcheryakova O. V. (eds.). Biota of northern lakes under anthropogenic impact. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2012. 230 p. (In Russ.)
- Kashulin N. A., Bekkelund A., Dauval'ter V. A., Petrova O. V. Apatite mining and concentration production and eutrophication of Arctic Lake Imandra. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2019;3(35):16–34. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2019-3-16-34.
- Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Denisov D. B., Val'kova S. A., Vandysh O. I., Terent'ev P. M., Zubova E. M., Koroleva I. M., Kosova A. L., Cherepanov A. A. Complex investigations of Fennoscandian freshwater ecosystems. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2018;9(9-6):34–86. (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86
- Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Skuf'ina T. P., Kotel'nikov V. A. Sustainable water use in the Arctic. New approaches and solutions. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2018;4(32):15–29. (In Russ.). doi: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29
- Kitaev S. P. Fundamentals of limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2007. 390 p. (In Russ.)
- Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov Sh. R., Rumyantsev V. A. (eds.). Current state and problems of anthropogenic transformation of the Lake Ladoga ecosystem under changing climate. Moscow: RAN; 2021. 637 p. (In Russ.). doi: 10.12731/978-5-907366-50-3
- Magurran A. E. Ecological diversity and its measurement. Netherlands: Springer; 2013. 181 p. doi: 10.1007/978-94-015-7358-0
- Meltoftre H. H., Josefson A. B. (eds.). Arctic biodiversity assessment: Status and trends in Arctic biodiversity – Conservation of Arctic Flora and Fauna. Denmark: Narayana Press; 2013. 674 p.
- Moiseenko T. I. (ed.). Anthropogenic modifications of the Lake Imandra ecosystem. Moscow: Nauka; 2002. 487 p. (In Russ.)
- Moiseenko T. I., Gashkina N. A., Sharov A. N., Vandysh O. I., Kudryavtseva L. P. Anthropogenic transformations of the Arctic ecosystem of Lake Imandra: tendencies for recovery after long period of pollution. *Water Resources*. 2009;36(3):296–309. doi: 10.1134/S0097807809030051
- Moiseenko T., Sharov A. Large Russian Lakes Ladoga, Onega, and Imandra under strong pollution and in the period of revitalization: a review. *Geosciences*. 2019;9(12):492. doi: 10.3390/geosciences9120492
- Moiseenko T. I., Yakovlev V. A. Anthropogenic transformations of aquatic ecosystems of the Kola North. Leningrad: Nauka; 1990. 220 p. (In Russ.)
- Roberts K. E., Lamoureux S. F., Kyser T. K., Muir D. C. G., Lafrenière M. J., Iqaluk D., Pieńkowski A. J., Normandeau A. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of high Arctic Lakes. *Scientific Reports*. 2017;7:13292. doi: 10.1038/s41598-017-13658-9
- Sala O. E., Chapin F. S., Armesto J. J., Berlow E., Bloomfield J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L. F., Jackson R. B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D. M., Mooney H. A., Oesterheld M., Poff N. L., Sykes M. T., Walker B. H., Walker M., Wall D. H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*. 2000;287:1770. doi: 10.1126/science.287.5459.1770
- Solomon C. T., Jones S. E., Weidel B. C., Buffam I., Fork M. L., Karlsson J., Larsen S., Lennon J. T., Read J. S., Sadro S., Saros J. E. Ecosystem consequences of changing inputs of terrestrial dissolved organic matter to lakes: current knowledge and future challenges. *Ecosystems*. 2015;18:376–389. doi: 10.1007/s10021-015-9848-y
- Sterligova O. P., Il'mast N. V., Kuchko Ya. A., Komulainen S. F., Savosin E. S., Baryshev I. A. State of freshwater reservoirs in Karelia with commercial cage farming of rainbow trout. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2018. 127 p. (In Russ.)
- Subetto D. A. (ed.). Paleolimnology of Lake Onego: from the Onego ice lake to the present state. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2022. 331 p. (In Russ.). doi: 10.17076/m-onegopaleo23
- Terent'eva I. A., Kashulin N. A., Denisov D. B. Estimate of the trophic status of subarctic Lake Imandra. *Vestnik MGTU = Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2017;20(1–2):197–204. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/2-197-204
- Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe. *Lauterbornia*. 2009;66:1–235.
- Tishkov A. A. "Arctic vector" in the conservation of terrestrial ecosystems and biodiversity. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2012;2(6):28–43. (In Russ.)
- Val'kova S. A., Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Sandimirov S. S. Structure and dynamics of zoobenthos communities in Lake Imandra near a copper-nickel smelter. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2012;2:22–39. (In Russ.)
- Val'kova S. A., Kashulin N. A. Features of structure and functioning of benthic communities under thermal pollution. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Kola Science Centre RAS*. 2013;3(16):97–105. (In Russ.)
- Volkova A. Yu., Khuobonen M. E. Assessment of morphometric and fish-breeding biological indicators of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt) of the Lena population grown in the Far North. *Vestnik MGTU = Bulletin of Murmansk State Technical University*. 2019;22(2):243–248. (In Russ.). doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-243-248
- Vshivkova T. S., Ivanenko N. V., Yakimenko L. V., Drozdov K. A. Introduction to freshwater biomonitoring. Vladivostok: VSUES; 2019. 239 p. (In Russ.)
- Yakovlev V. A. Freshwater zoobenthos of Northern Fennoscandia (diversity and anthropogenic dynamics). Apatity: KSC RAS; 2005. Part 1. 161 p. (In Russ.)
- Yakovlev V. A. Methods for assessing water quality using zoobenthos of Lake Imandra. *Monitoring prirodnoi sredy Kol'skogo Severa = Monitoring of the natural environment of the Kola North*. Apatity: Kol. fil. AN SSSR; 1984. P. 39–50. (In Russ.)
- Yakovlev V. A. Response of zooplankton and zoobenthos to changes in water quality in a subarctic water body (case study of Lake Imandra). *Vodnye resursy = Water Resources*. 1998;25(6):715–723. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 20.09.2025; принята к публикации / accepted: 11.03.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Савосин Евгений Сергеевич

канд. биол. наук, научный сотрудник лаборатории
экологии рыб и водных беспозвоночных

e-mail: szhenya@list.ru

Савосин Денис Сергеевич

канд. биол. наук, младший научный сотрудник
лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных

e-mail: sadenser@inbox.ru

CONTRIBUTORS:

Savosin, Evgeny

Cand. Sci. (Biol.), Researcher

Savosin, Denis

Cand. Sci. (Biol.), Junior Researcher