

**МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА МАКРОЗООБЕНТОСА
ВОДОЕМА В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СТОКАМИ
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

С.А. Валькова

*Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН,
ул. Ферсмана, 14а, г. Апатиты, 184 209, Россия.
E-mail: s.valkova@ksc.ru*

На примере озера Большой Вудъявр, загрязняемого стоками апатит-нефелинового производства проанализированы изменения состава и структуры макрозообентоса в многолетней динамике. Показано, что донная фауна характеризуется невысоким таксономическим разнообразием на фоне относительно высоких значений численности и биомассы. В глубоководной зоне водоема сформированы пелофильные зооценозы, состоящие из эврибионтных видов олигохет (Tubificinae), хирономид (п/сем. Chironominae, Tanypodinae), и двустворчатых моллюсков (Pisidiidae). В прибрежной зоне в составе зообентоса преобладают хирономиды подсемейства Orthocladiinae, дополняют сообщества двустворчатые моллюски, олигохеты и комплекс видов, характерных для литоральной зоны (брюхоногие моллюски, ручейники, жесткокрылые, поденки, веснянки). В структуре глубоководных донных биоценозов наблюдается тенденция к увеличению доли двустворчатых моллюсков от 30 % в 2001 г. до 66 % в 2022 г. Средний уровень биомассы зообентоса в озере изменяется от «умеренного» (5,0–10,0 г/м²) до «повышенного» класса (10–20 г/м²).

**THE LONG-TERM DYNAMICS OF ZOOBENTHOS COMMUNITIES
IN THE LAKE UNDER CONDITIONS OF WASTEWATER
POLLUTION FROM APATITE-NEPHELINE PRODUCTION**

S.A. Valkova

*Institute of North Industrial Ecology Problems, Russian Academy of Sciences,
Kola SC, 14a Fersman st., Apatity, 184 209, Russia.
E-mail: s.valkova@ksc.ru*

The changes in the composition and structure of zoobenthos of Bolshoi Vudyavr Lake were analyzed in the long-term dynamics. Benthic fauna is characterized by low taxonomic diversity. Zoocenosis consists of eurybiont species of oligochaetes (Tubificinae), chironomids (Chironiminae, Tanypodinae), and mollusks (Pisidiidae) in the deep-water zone. Chironomids Orthocladiina dominated in the littoral zone. Communities are complemented by bivalves, oligochaetes and invertebrates typical for the littoral zone of the lakes (gastropods, caddisfly, beetles, mayflies, stoneflies). In the structure of deep-water biocenoses there is a tendency of increasing of mollusks Pisidiidae. Their share in the total number of invertebrates increased from 30 % in 2001 to 66 % in 2022. Zoobenthos are characterized by relatively high values of abundance number and biomass. The average level of biomass of zoobenthos in the lake varies from “moderate” (5,0–10,0 g/m²) to “elevated” class (10–20 g/m²).

Введение

Апатит-нефелиновые месторождения Хибин относятся к крупнейшим в мире месторождениям фосфатного сырья. Их добыча и переработка началась в 20-х годах прошлого столетия и повлекла за собой трансформацию всех природных комплексов в регионе, особенно водоемов и водотоков.

Озеро Большой Вудъявр является наиболее крупным внутренним водоемом Хибинского горного массива (рис. 1). Относится к классу небольших озер, площадь его водной поверхности составляет 3,49 км², объем воды – 0,058 км³, наибольшая глубина – 37,6 м. Длина озера около 2 км, ширина – около 1,5 км, площадь водосбора – около 100 км² (Каталог озер..., 1962; Кашулин и др., 2013). С 1931 г. озеро Бол. Вудъявр является приемником сточных вод КФ АО «Апатит», которые стали играть ведущую роль в формировании химического состава воды и донных отложений водоема (Кашулин и др., 2008). В их составе поступают соединения азота, органические и взвешенные вещества, фосфаты и нефтепродукты. Кроме того, дополнительную антропогенную нагрузку создает городская среда, автомобильные и железнодорожные пути сообщения, связывающие г. Кировск и территории рудников. Вследствие этого химический состав воды и донных отложений озера претерпел значительные изменения, возросла минерализация воды, изменилась величина рН, содержание соединений азота и фосфора, по содержанию биогенных элементов в настоящее время озеро характеризуется как эвтрофное (Кашулин и др., 2013; Даувальтер и др., 2021). В поверхностных слоях донных отложений все элементы, связанные с апатитонепфелиновым производством, находятся в повышенных концентрациях, при этом самые современные слои седиментов озера (от 4 см и выше) начиная с начала 2000-х годов характеризуются постепенным снижением уровня загрязнения (Dauvalter et al., 2022).

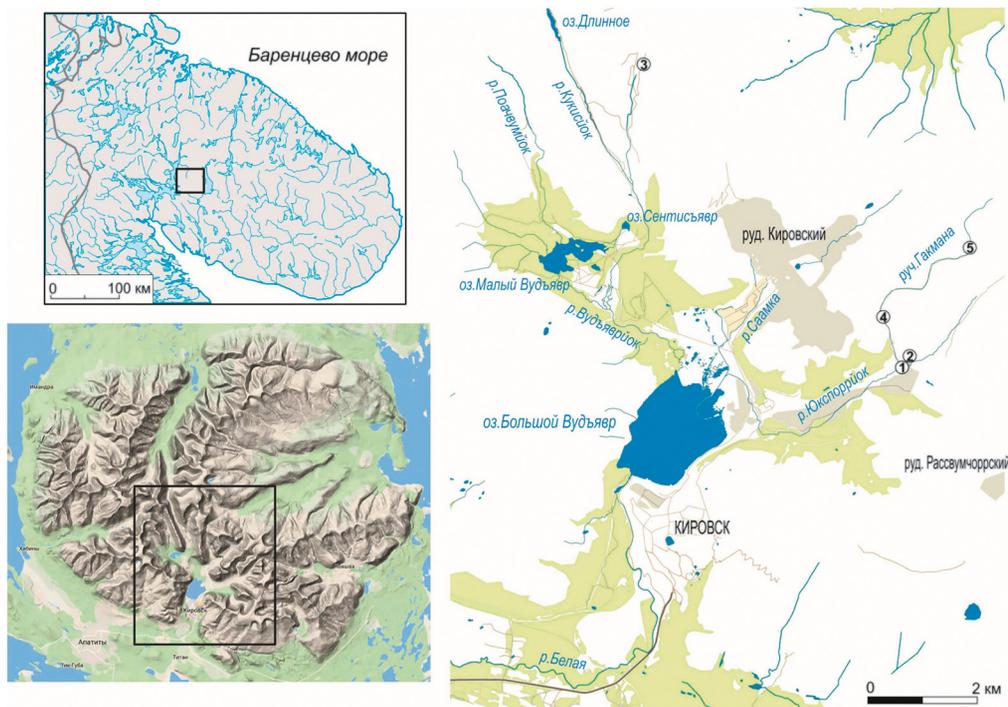


Рис. 1. Схема района исследований

Комплексное антропогенное загрязнение озера отразилось на развитии гидробионтов, трансформации состава и структуры фитопланктона, зоопланктона, зообентоса и ихтиофауны, результаты изучения которых описаны ранее в ряде работ (Каныгина, 1939; Кашулин и др., 2009; Kashulin et al., 2017).

Цель данной работы – анализ изменений состава и структуры сообществ глубоководного макрозообентоса озера Большой Вудъявр за период с 1939 по 2022 гг.

Материалы и методы

Материалом для сообщения послужили собственные данные, полученные в 2008, 2010, 2022 гг., а также результаты исследований, проведенных в 1938–1939 гг. и 2001 г. (Каныгина, 1939; Кашулин и др., 2009).

Отбор проб зообентоса проводили в различных зонах озера (0–9 м, 9–26 м, 26–36 м) 19.06.2008, 07.07.2010 и 13.07.2022 г. Всего в 2008 г. отобрано 12 проб, в 2010 г. – 18, в 2022 г. – 12. В прибрежной зоне озера (0–9 м) грунты преимущественно галечниково-песчаные, в сублиторальной (9–26 м) и профундальной (26–36 м) зонах донные отложения представляют собой ил, в составе которого преобладают частицы размером от 0,001 до 0,25 мм (Югай и др., 2013; Dauvalter et al., 2022). В литоральной зоне при отборе проб использовался ручной гидробиологический сачок (длина лезвия 25 см, размер ячеек сетки 0,25 мм), которым собирались животные с площади 0,25x1,0 м² в соответствии с общепринятыми стандартами и методами (Frost et al., 1971). В сублиторальной и профундальной зонах пробы зообентоса отбирали с использованием дночерпателя системы Экмана-Берджа (площадь захвата грунта 0,289 м²), далее пробы промывались через сито с размером ячеек 0,25 мм. Пробы фиксировались 70 %-ным этиловым спиртом. Дальнейшая их разборка по таксономическим группам осуществлялась в лабораторных условиях с применением бинокуляра. Биомасса животных рассчитывалась по их сырой массе, которая измерялась при помощи торсионных весов. Средние показатели численности и биомассы пересчитывали на 1 м². Идентификацию беспозвоночных проводили по «Определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России» (2016), «Определителю пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий» под редакцией С.Я. Цалолихина (2000, 2001). Хирономид определяли по личиночным стадиям.

Результаты и обсуждение

Ранние исследования зообентоса озера Бол. Вудъявр проводились в 1938–1939 гг. в период наиболее интенсивного загрязнения водоема. В составе бентофауны были отмечены только личинки хирономид родов *Monodiamesa*, *Procladius*, *Psectrocladius* и олигохеты. Средние значения численности оценивались в 93 экз./м², при этом в глубоководной зоне озера (33 м) зообентос отсутствовал, что, вероятно, было обусловлено заморными явлениями. В литоральной и сублиторальной зонах численность животных составляла 124–140 экз./м² (Каныгина, 1939).

В 2001 г. в зообентосе оз. Бол. Вудъявр отмечены беспозвоночные четырех таксономических групп: Chironomidae, Oligochaeta, Bivalvia и Nematoda. Хирономиды, олигохеты и моллюски доминировали по численности и биомассе в донных сообществах, суммарная доля этих групп составляла более 95 %. Наиболее высокие показатели обилия донных беспозвоночных наблюдались в прибрежной зоне озера (0–9 м), где их численность составляла 5,6 тыс. экз./м², а биомасса – около 20 г/м².

Среди животных здесь доминировали личинки хирономид, которые более чем на 40 % определяли общую численность зообентоса. В сублиторальной и профундальной зонах озера показатели обилия донных беспозвоночных были существенно ниже – 2,9 тыс. экз./м² и 4,9 г/м², преобладали в сообществах малощетинковые черви семейства Tubificinae, доля которых в глубоководной зоне достигала 92 % (Кашулин и др., 2009).

В 2008 г. в составе зообентоса отмечены личинки хирономид (*Procladius* gr. *choreus*, *Chironomus* sp., *Monodiamesa bathyphyla* (Kieff., 1918), *Prodiamesa olivacea* (Meigen, 1818)), олигохеты Tubificinae, двустворчатые и брюхоногие моллюски, ручейники сем. Limnephilidae и личинки комаров-мокрецов (Ceratopogonidae). В прибрежной зоне озера численность зообентоса составляла 1,3 тыс. экз./м², биомасса – 17,7 г/м², доминировали в сообществах хирономиды, олигохеты и двустворчатые моллюски, суммарная доля этих групп достигала 82 %. В сублиторальной и профундальной зонах средняя численность зообентоса составляла 2,0 тыс. экз./м², биомасса – 11,4 г/м², доминировали в сообществах олигохеты (в среднем 69 % от общего количества беспозвоночных).

В 2010 г. в составе зообентоса были представлены хирономиды (*Procladius* gr. *choreus*, *Chironomus* sp., *Orthocladius/Cricotopus* sp., *Diamesa* sp.), олигохеты, двустворчатые моллюски, ручейники Limnephilidae, веснянки *Arcynopteryx compacta* (McLachlan, 1872), поденки *Baetis rhodani* (Pictet, 1843), жесткокрылые сем. Dytiscidae. Численность зообентоса в прибрежной зоне оценивалась в 2,1 тыс. экз./м², биомасса – 7,6 г/м². Доминировали в сообществах малощетинковые черви и хирономиды, доля других групп не превышала 10 %. В глубоководной зоне водоема количественные показатели составляли 0,7 тыс. экз./м² и 2,7 г/м², преобладали в сообществах олигохеты и двустворчатые моллюски.

В 2022 г. в литоральной зоне озера основу зообентоса формировали 3 группы: хирономиды, олигохеты Tubificidae и личинки водных жуков. Наиболее многочисленны были приуроченные к обрастаниям хирономиды *Orthocladius/Cricotopus*, доля которых в составе макробентоса достигала 71 % от общей численности и биомассы беспозвоночных. Единично в составе хирономидных комплексов были отмечены личинки *Diamesa* sp. и *Tanytarsus* sp. Второй по обилию группой зообентоса были личинки жесткокрылых *Hydroporus* sp. (16 % от общего обилия), дополняли руководящий комплекс олигохеты (6 %) и брюхоногие моллюски *Lymnaea* (7 %). Средняя численность литорального зообентоса составляла 3,3 тыс. экз./м², биомасса – 18,1 г/м². В составе зообентоса глубоководной зоны водоема отмечены олигохеты, хирономиды (*Procladius* gr. *choreus*, *Chironomus* sp.) и двустворчатые моллюски. Доминировали в сообществах сублиторальной и профундальной зон мелкие двустворчатые моллюски *Euglesa* sp., доля которых варьировала от 50 % до 95 % общей численности и биомассы бентофауны, численность зообентоса составляла в среднем 0,8 тыс. экз./м², биомасса – около 5,3 г/м².

Таким образом, донные биоценозы озера Бол. Вудъявр сформированы в условиях долговременного комплексного антропогенного воздействия. В период наиболее активной трансформации водоема (1938–1939 гг.) зообентос характеризовался крайне низкими значениями численности и биомассы, а в глубоководной зоне водоема отсутствовал. Последующие исследования зообентоса, проведенные в 2001–2022 гг., показали, что в водоеме сформировались относительно стабильные сообщества, которые характеризовались невысоким, по сравнению с условно-фоновыми водоемами региона, таксономическим разнообразием (Яковлев, 2005, Валькова, 2020), при этом состав фауны на протяжении последних двух десятилетий

(с 2001 по 2022 гг.) оставался постоянным. В глубоководной зоне озера сформированы зооценозы, состоящие из олигохет Tubificinae, хирономид Chironominae и Tanypodinae, и двустворчатых моллюсков Pisidiidae – эврибионтных видов, адаптированных к илистым грунтам, устойчивых к дефициту кислорода и широкому спектру загрязняющих веществ органической и неорганической природы в воде и верхних слоях донных отложений. В прибрежной зоне в составе зообентоса преобладали фитофильные и фитопелофильные виды хирономид подсемейства Orthoclaadiinae, дополняли сообщества двустворчатые моллюски, олигохеты и комплекс видов, характерных для литоральной зоны водоемов региона. В трофической структуре макрозообентоса озера преобладали грунтозаглатыватели и собиратели-детритофаги, группировка хищников развита слабо. Такая структура сообществ, направленная на утилизацию избыточного органического вещества и биогенов, свидетельствует о преобладании детритных пищевых цепей в водоеме.

Зооценозы характеризовались относительно высокими значениями численности и биомассы, при незначительном варьировании этих показателей на протяжении периода наблюдений с 2001 по 2022 гг. Основываясь на средних значениях биомассы зообентоса и «шкале трофности» С.П. Китаева (2007), можно констатировать, что уровень биомассы в озере в разные годы варьирует от «умеренного» (5,0–10,0 г/м²) до «повышенного» класса (10–20 г/м²) (табл.).

В структуре глубоководных донных биоценозов сохранялась отмеченная в 2001 г. тенденция к увеличению доли двустворчатых моллюсков Pisidiidae. В 2001–2010 гг. доля группы составляла в среднем около 30% в общей численности беспозвоночных, к 2022 г. этот показатель увеличился до 66%. В профундальной зоне водоема на протяжении всего периода наблюдений преобладали олигохеты семейства Tubificinae, однако их доля снизилась с 92–95% в 2001–2008 гг. до 58–60% в 2010 и 2022 гг. (рис. 2).

Таблица 1

Состав и количественные показатели зообентоса оз. Бол. Вудьявр
в разные периоды исследований

| Показатели | 1938–1939 гг.* | 2001 г.* | 2008 г. | 2010 г. | 2022 г. |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|---|---|
| Общее кол-во групп | 2 | 4 | 6 | 7 | 6 |
| Доминанты: прибрежная зона (0–9 м) | олигохеты Tubificinae хирономиды | хирономиды олигохеты Tubificinae | хирономиды моллюски <i>Euglesa</i> sp. | олигохеты Tubificinae хирономиды <i>Orthocladius</i> <i>/Cricotopus</i> | хирономиды <i>Orthocladius</i> <i>/Cricotopus</i> |
| Доминанты: глубоководная зона (9–30 м) | – | олигохеты Tubificinae | олигохеты Tubificinae хирономиды <i>Procladius choreus</i> <i>Chironomus</i> sp. | олигохеты Tubificinae хирономиды <i>Procladius choreus</i> <i>Chironomus</i> sp. | олигохеты Tubificinae моллюски <i>Euglesa</i> sp. |
| N, тыс. экз./м ² | 0,09 | 3,6 | 2,1 | 1,2 | 2,1 |
| B, г/м ² | – | 9,0 | 14,2 | 4,6 | 11,8 |
| Трофический статус (по Китаеву, 2007) | – | β-мезотрофный | α-эвтрофный | α-мезотрофный | α-эвтрофный |

Примечание: * 1938–1939 гг. – по Каныгина, 1939; 2001 г. – по Кашулин и др., 2009.

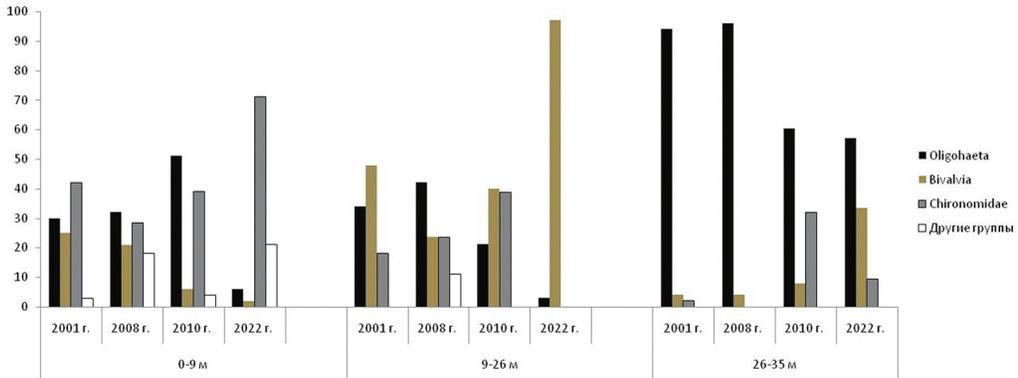


Рис. 2. Относительная численность групп беспозвоночных в сообществах зообентоса оз. Бол. Вудъявр, %

Увеличение в глубоководной зоне водоема доли фильтраторов – двустворчатых моллюсков и хирономид рода *Chironomus*, а также факультативных хищников *Procladius* может свидетельствовать о снижении антропогенной нагрузки на экосистему водоема в последнее десятилетие. Косвенным подтверждением полученной оценки экологической ситуации по зообентосу могут служить некоторые результаты геохимических исследований донных отложений водоема. Как показал анализ вертикального распределения химических элементов в колонке озерных осадков, уровень загрязнения верхних слоев донных отложений оз. Бол. Вудъявр имеет тенденцию к снижению с начала 2000-х годов (Dauvalter et al., 2022).

Заключение

Таким образом, анализ многолетней динамики состава и количественных показателей зообентоса озера Большой Вудъявр показал, что за длительный период интенсивного антропогенного загрязнения в водоеме сформировались относительно однородные зооценозы, в которых комплекс доминантов представлен видами, устойчивыми к эвтрофированию и характеризующиеся высокими значениями численности и биомассы. В трофической структуре зооценозов преобладают грунтозаглатыватели и собиратели-детритофаги, в то же время отмечена устойчивая тенденция к росту доли организмов-фильтраторов.

Работа выполнена в рамках темы НИР FMEZ-2022-0008.

Литература

- Валькова С.А. 2020.** Таксономический состав и структура макрозообентоса разнотипных водоемов Зеленого пояса Фенноскандии в пределах Мурманской области // Труды Карельского научного центра РАН. Серия Биogeография. № 1. С. 56–70.
- Даувальтер В.А., Слукровский З.И., Денисов Д.Б., Гузева А.В. 2021.** Геохимия арктического горного озера в условиях загрязнения стоками апатит-нефелинового производства // Труды Фермановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. № 18. С. 140–144.
- Каныгина А.В. 1939.** Гидробиологическое и гидрохимическое исследование озер Большой и Малый Вудъявр. Апатиты: Кольская научно-исследовательская база АН СССР. 206 с. (Фонды КНЦ РАН; № 105).
- Каталог озер Мурманской области. 1962.** М.-Л.: Изд-во АН СССР. 146 с.
- Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Малиновский Д.Н., Вандыш О.И., Ильяшук Б.П., Кудрявцева Л.П. 2008.** Антропогенные изменения водных экосистем Хибинского горного массива (Мурманская область). Т. 1. Апатиты: КНЦ РАН. 250 с.

- Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Малиновский Д.Н., Вандыш О.И., Ильяшук Б.П., Кудрявцева Л.П. 2009.** Антропогенные изменения водных экосистем Хибинского горного массива (Мурманская область). Т. 2. Апатиты: КНЦ РАН. 282 с.
- Кашулин Н.А., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кудрявцева Л.П., Терентьев П.М., Денисов Д.Б., Вандыш О.И., Королева И.М., Валькова С.А., Кашулина Т.Г. 2013.** Аннотированный экологический каталог озер Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области (бассейн Баренцева и Белого морей и Ботнического залива Балтийского моря). Ч. 2. Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 253 с.
- Китаев С.П. 2007.** Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 395 с.
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. 2016.** Зообентос. Т. 2. М.-СПб.: КМК. 457 с.
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. 2000.** Двукрылые насекомые. Т. 4. СПб.: Наука. 997 с.
- Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. 2001.** Высшие насекомые. Т. 5. СПб.: Наука. 825 с.
- Югай В.С., Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. 2013.** Содержание биодоступных форм соединений металлов в донных отложениях водоемов и коэффициент накопления (K_d) как показатели экологической обстановки водоемов (на примере озер Мурманской области) // Вестник МГТУ. Т. 16. № 3. С. 591–600.
- Яковлев В.А. 2005.** Пресноводный зообентос Северной Фенноскандии (разнообразие, структура и антропогенная динамика). Ч. 1. Апатиты: Изд. КНЦ РАН. 161 с.
- Dauvalter V., Slukovskii Z., Denisov D., Guzeva A. 2022.** A Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake Pollution // Water. Vol. 14. P. 4044
- Frost S., Huni A., Kershaw W.E., 1971.** Evaluation of a kicking technique for sampling stream bottom fauna // Canadian Journal of Zoology. N 49. P. 67–183.
- Kashulin N.A., Dauvalter V.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentjev P.M., Kashulin A.N. 2017.** Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia // Journal Environ. Sci. Health. Part A. N 52. P. 921–929.