



Аквакультура

Состояние планктонных и бентосных сообществ шхерного района Ладожского озера вблизи садковых рыбоводных хозяйств

Д.С. Дудакова¹, Л.Л. Капустина¹, Г.Г. Митрукова¹, А.Е. Трифонов², К.М. Зарипова¹

¹ Санкт-Петербургский ФЦ РАН, институт озерадения РАН (ФГБУН «ИНОЗ РАН»), ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105

² Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга), наб. Макарова, 26, Санкт-Петербург, 199053

E-mail: judina-d@yandex.ru

SPIN-код: Д.С. Дудакова – 9320–1292; Л.Л. Капустина – 4252–6853; Г.Г. Митрукова – 5725–7223; А.Е. Трифонов – 5330–0520; К.М. Зарипова – 4535–0790

Цель работы: оценка воздействия форелевых хозяйств на экологическое состояние шхерного района Ладожского озера по гидробиологическим параметрам.

Основными методами исследования были отбор и обработка проб бактериопланктона, зоопланктона, бентоса; расчёт численности и биомассы гидробионтов; анализ таксономической структуры, видовые определения, следуя стандартным процедурам, используемым в гидробиологии.

В результате было выявлено изменение количественного развития сообществ бактерио- и зоопланктона, макро- и мейобентоса, изменение структуры, упрощение таксономического состава, снижение видового богатства, появление видов-индикаторов токсического загрязнения в сообществах зоопланктона и бентоса под садками в зонах влияния форелевых хозяйств. Отмечены различия степени выраженности негативного влияния исследованных хозяйств, что можно связать с гидродинамическим фактором, поскольку одно из хозяйств находится в условиях большей проточности по сравнению с другим. Оценка качества среды по планктонным и бентосным сообществам показала присутствие негативного воздействия форелевых хозяйств, степень которого зависит от расположения хозяйства и степени проточности на участке акватории, где располагаются садки.

Ключевые слова: садковые хозяйства, бактериопланктон, зоопланктон, макро- и мейобентос, Ладожское озеро.

The state of planktonic and benthic communities of the skerry region of Lake Ladoga near fish farms

Dina S. Dudakova¹, Larisa L. Kapustina¹, Galina G. Mitrukova¹, Artem E. Trifonov², Ksenia M. Zaripova¹

¹ St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Institute of Limnology («IL RAS»), 9, Sevast'yanova st. St. Petersburg, 196105, Russia

² St. Petersburg branch of VNIRO (L.S. Berg «GosNIORKh»), 26, emb. Makarova, St. Petersburg, 199053, Russia

The aim of this work is to assess the impact of trout farms on the ecological state of a freshwater body (Lake Ladoga) using hydrobiological parameters.

The main methods of the study were sampling and processing of bacterioplankton, zooplankton, benthos; calculation of abundance and biomass of hydrobionts; analysis of taxonomic structure, species determinations, following standard procedures used in hydrobiology.

As a result, a change in the quantitative development of bacterio- and zooplankton, macro- and meiobenthos communities, change in structure, simplification of taxonomic composition, decrease in species richness, appearance of species-indicators of toxic pollution in zooplankton and benthos communities under cages in the zones of influence of trout farms was revealed. Differences in the degree of severity of negative impact at the studied farms were noted, which can be attributed to the hydrodynamic factor, since one of the farms is located in conditions of greater flow compared to the other. Environmental quality assessment of planktonic and benthic communities showed the presence of negative impact of trout farms, the extent of which depends on the location of the farm and the degree of flow in the water area where the cages are located.

Keywords: trout farms, bacterioplankton, zooplankton, macro- and meiobenthos, Lake Ladoga.

ВВЕДЕНИЕ

Аквакультура является одной из самых быстро развивающихся и надёжных отраслей производства продовольствия. На территории Российской Федерации наиболее распространённым биологическим видом лососевых, как объекта хозяйственного разведения, является радужная форель (*Parasalmo mykiss*,

Walbaum, 1792). К сожалению, сектор сталкивается с рядом проблем. В основном это связано с использованием открытых систем садкового культивирования, оказывающих непосредственное влияние на окружающую среду и экосистему в целом. Принципиальное отличие рыбного хозяйства от большинства других отраслей состоит в том, что воспроизводство

рыбных ресурсов напрямую зависит от экологической ситуации на акватории водного объекта. Поэтому для обеспечения экологической безопасности рыбохозяйственных водоёмов необходим комплексный мониторинг параметров водной среды. Изучение роли каждого компонента в структуре и процессах круговорота элементов и потоках энергии внутри биологического сообщества необходимо для оценки данной экосистемы в целом с точки зрения её эффективности.

Гетеротрофные микроорганизмы обеспечивают трансформацию органического вещества и энергии внутри биологического сообщества, отвечают за рециклинг биогенных элементов в водной среде, тем самым играя ведущую роль в процессах самоочищения водоёмов [Романенко, 1985; Stone, Weisburd, 1992]. Бактериопланктон – важный пищевой ресурс для простейших и многоклеточного зоопланктона, он имеет большое значение в структурной организации и функциях морских и пресноводных экосистем [Сорокин, 1974]. Бактерии, обладая высокой скоростью реагирования на изменение условий среды, служат индикаторами качества вод и состояния экосистемы. Для оценки качества воды как среды обитания биоресурсов используются различные микробиологические параметры. Однако, прямой подсчёт общего количества бактерий в воде, в отличие от определения численности бактерий отдельных физиологических групп, имеет то преимущество, что анализируется всё сообщество бактерий.

Зоопланктонные сообщества, находясь в толще воды, подвергаются серьёзному антропогенному воздействию в районе садковых хозяйств. Состояние этих сообществ является важным индикатором качества окружающей среды из-за быстрой реакции на изменение гидрохимических показателей [Кучко, 2004]. Можно отслеживать состояние водной среды и изменение трофности водоёма благодаря изменению структуры, видового состава и количественных характеристик популяций зоопланктона [Батурина и др., 2015; Фомина и др., 2019].

Бентосные организмы отражают картину более долговременных последствий изменения окружающей среды по сравнению с бактериопланктоном и зоопланктонными организмами, поэтому изучение бентоса также является чрезвычайно важным для оценки влияния рыбоводных хозяйств на прибрежные зоны водоёма [Савосин, 2010]. Спецификой функционирования многих рыбоводных хозяйств является накопление всех поступающих с форелевых ферм биогенных элементов во внутренних пресноводных водоемах, на которых они размещаются. Это создаёт условия для особо сильного антропогенного пресса

на биоту пресноводных водоёмов, в частности, Ладожского озера [Савосин, 2010; Михайленко, Стерлигова, 2021].

Республика Карелия является одним из основных регионов России по производству форелевой продукции. В связи с этим наибольшее число исследований проводится на Онежском озере и других водоёмах Карелии [Савосин, 2010; Рыжков и др., 2011; Стерлигова и др., 2019; Фомина и др., 2019; Кучко, Савосин, 2020; Михайленко, Стерлигова, 2021]. По Ладожскому озеру информация о влиянии на водную биоту деятельности форелевых хозяйств отсутствует.

Цель работы: оценка воздействия форелевых хозяйств на экологическое состояние пресноводного водоёма (Ладожское озеро) по гидробиологическим параметрам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились с 1 по 3 июня 2022 г. на двух форелевых хозяйствах в шхерном районе Ладожского озера (рис. 1). В каждом хозяйстве было заложено по три станции: в хозяйстве 1 (у г. Лахденпохья): ст. Коко5, Коко4, и Коко7 с глубинами 30, 33 и 24 м, соответственно; в хозяйстве 2 (у г. Сортавала): Сорт1, Сорт4 и Сорт13 с глубинами 17, 20 и 19 м, соответственно. Первые из перечисленных (по хозяйствам) находились непосредственно у садков, с внешней стороны, вторые – на удалении нескольких сотен метров; третьи (контроль) – на расстоянии порядка 1 км от садков.

Исследуемое рыбоводное хозяйство 1 расположено в шхерах Якимварского залива у г. Лахденпохья (рис. 1). Согласно спутниковым снимкам, первые садки в бухте появились в 2011 г. В среднем, изучаемое хозяйство 1 производит 1000 тонн рыбы в год. Особенностью функционирования форелевых хозяйств является сезонное изменение интенсивности режима кормления, связанное с температурой воды. Зимой при низких температурах объём вносимого корма минимален, с наступлением весны и в течение лета увеличивается, к концу осени постепенно снижается. В августе во время самого активного сезона кормления общее поступление корма в садки составляет 6–10 тонн в сутки.

Масштабы влияния деятельности рыбоводных хозяйств зависят от рельефа и гидрологических особенностей акваторий, на которых они расположены. Исследуемая бухта Якимварского залива вытянута с юга на север, её общая протяжённость составляет 2,4 км, максимальная глубина – 48 м. Бухта имеет 6 каналов, соединяющих её с шхерной системой. Восточный и западный каналы имеют значительные подъёмы дна

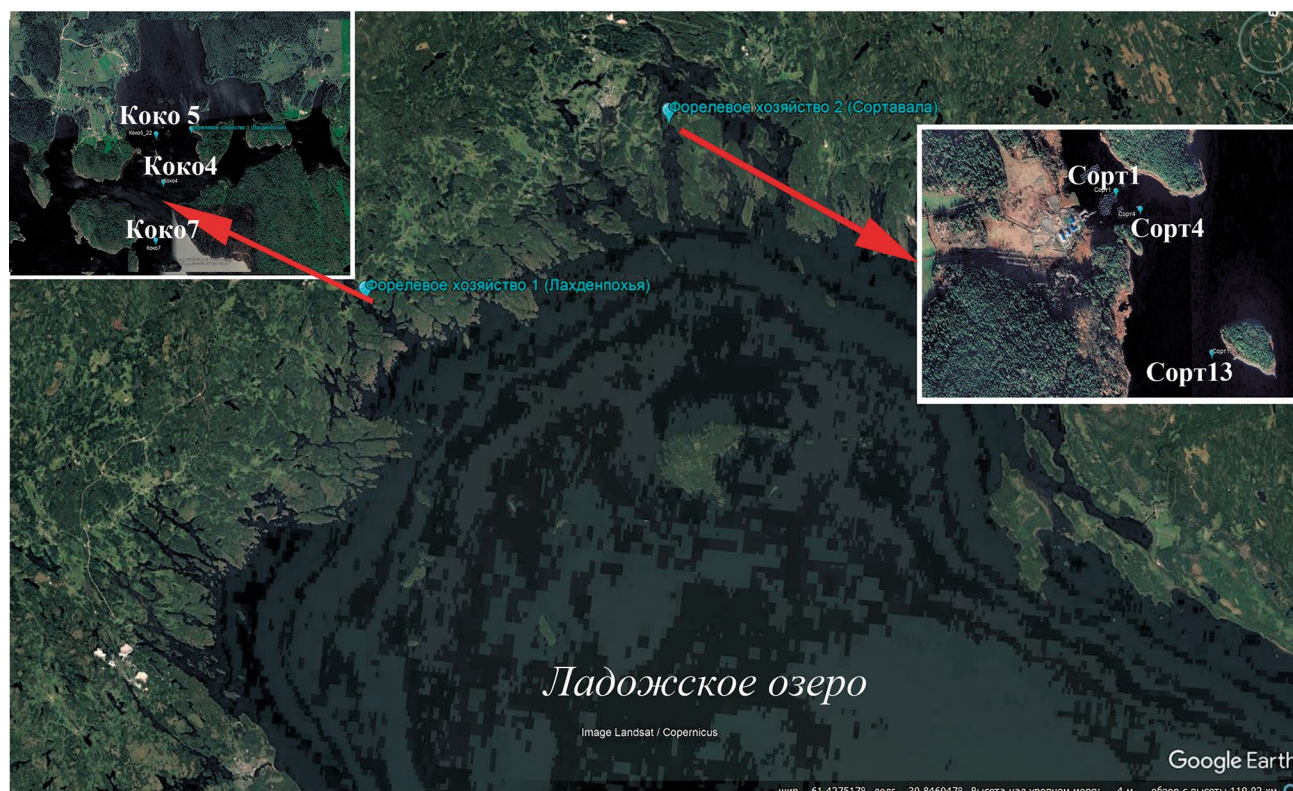


Рис. 1. Локализация исследуемых форелевых хозяйств и станций отбора проб

Fig. 1. The location of the studied trout farms and sampling stations

(глубина 3–10 м), препятствующие перемешиванию воды в бухте и перемещению донных осадков. Подводные гряды препятствуют обмену осадочным материалом между отдельными котловинами, которые таким образом представляют своеобразные конечные седиментационные бассейны для локальных источников загрязнения. Глубина северного канала составляет около 25 м.

В шхерном районе Ладожского озера отсутствуют постоянные течения. Единственной формой водообмена северных заливов с озером являются ветровые сгонно-нагонные течения с двухслойной циркуляцией вод. При нагонах поверхностное течение направлено в залив, а в придонном слое возникает поток, направленный в озеро. Средние скорости глубинных течений 1–4 см/с [Охлопкова, 1966].

Поверхностный и придонный слои воды в бухте хозяйства 1 характеризуются положительными значениями окислительно-восстановительного потенциала (от +84 mV до +113 mV) и значениями водородного показателя, близкими к нейтральным (7,1–7,2).

Донные отложения представлены мягкими мелкодисперсными илами (характеризующимися низкой степенью аэрации) с относительно высокими содержаниями органического вещества в поверхностном горизонте (с 6,8% на фоновой точке до 56,6% не-

посредственно под садками). В поверхностном слое донных отложений преобладает восстановительная обстановка (от -188 mV до -127 mV), реакция среды слабокислая и близкая к нейтральной (6,37–7,22).

Хозяйство 2 расположено в протоке между о. Риеккалансаари и о-вами Ваннисенсаари и Лукасаари в северо-западной части Сортавальского шхерного района (рис. 1). Объём производства товарной рыбы достигает 200–500 тонн в год. Функционирование хозяйства 2 началось в 2010 году, согласно спутниковым снимкам.

Исследуемая протока (в проливе Хонкасалонселькя) вытянута с юга на север и имеет протяжённость около 3 км. Глубины в протоке не превышают 30 м. В проливе глубины колеблются от 10 до 80 м. В отличие от хозяйства 1, в изучаемой протоке наблюдались сильные течения.

Относительно небольшие глубины протоки и перемешивание вод способствуют аэрации. Поверхностный и придонный слои воды характеризуются положительными значениями окислительно-восстановительного потенциала (от +83 mV до +108 mV) и нейтральными значениями водородного показателя (6,84–7,30).

Донные отложения представлены мягкими алевритовыми илами, что способствует пониженной сорб-

ции поступающих веществ и повышенной аэрации по сравнению с мелкодисперсными илами.

Содержание органического вещества в летний сезон в поверхностном слое донных осадков изменяется от 6,0% на фоновой точке до 21% на точке у садков. В поверхностном слое донных отложений преобладают бескислородные условия (-119 mV до -81 mV) и слабкокислая и нейтральная реакция среды (6,26–6,77).

Результаты измерения физико-химических параметров воды и донных отложений, а также анализа содержания органического вещества в поверхностном слое донных отложений получены по методике, используемой сотрудниками ИНОЗ РАН для работ на рыбоводных хозяйствах [Lapenkov, 2022].

Микробиологические пробы отбирались батометром Руттнера из придонного слоя воды с внешней стороны садка в стерильные пластиковые контейнеры объёмом 120 мл и фиксировались 40% формалином до конечной концентрации в пробе 2%. На станциях Коко7 и Сорт4 микробиологические пробы не отбирали. Общее количество бактерий в воде определялось методом эпифлуоресцентной микроскопии [Porter, Feig, 1980; Кузнецов, Дубинина, 1989]. Использовались нуклеопоровые поликарбонатные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм, окрашенные насыщенным спиртовым раствором красителя судана чёрного. Аликвота исследуемой воды (5 мл) окрашивалась флуорохромом ДАФИ (4'-диамидино-2-фенилиндол) в течение 15 минут, а затем отфильтровывалась. Бактериальные клетки подсчитывались на фильтре с помощью биологического эпифлуоресцентного микроскопа МИКМЕД – 26 не менее чем в 20-и полях зрения. Зоопланктонные пробы отбирались на трёх станциях вертикальным ловом при помощи планктонной сети Джели (входное отверстие диаметром 13 см, диаметр ячеи 120 мкм). Два вертикальных лова на каждой станции объединяли в одну интегральную пробу. Также на каждой станции облавливался придонный слой воды (не выше 1 метра от дна) батометром Руттнера (объём 2,0 л) с последующим проливом через планктонную сеть Апштейна (диаметр ячеи 120 мкм). Пробы фиксировались 4%-ным формалином [Методические рекомендации..., 1982¹]. Для определения видов использовались определители пресноводной фауны. Материал обрабатывался счётно-весовым методом с определением размерно-возрастного состава популяции каждого

вида. Пробы концентрировались до объёма 50–100 мл и просчитывались в камере Богорова в порциях по 1–2 мл с последующим пересчётом на весь объём пробы. Крупные формы просчитывались во всём объёме пробы. Организмы идентифицировались до вида. Биомасса отдельных видов определялась с применением индивидуальных весов организмов, рассчитанных по формуле зависимости массы тела от его длины. В качестве базовых данных для оценки обилия зоопланктона использовались показатели численности (тыс. экз./м³) и биомассы (г/м³) видов, основных систематических групп (коловратки – Rotifera, ветвистоусые ракообразные – Cladocera, веслоногие ракообразные – Copepoda) и зоопланктона в целом. Камеральная обработка материала проводилась с использованием бинокля МБС-10 и микроскопа МИКРОМЕД.

При сборе и обработке бентоса применялись стандартные принятые в гидробиологии методы [Методические рекомендации..., 1983²]. Отбор проб донных отложений на исследование зообентоса проводился с помощью коробчатого дночерпателя ДАК-250 (модификация Экмана-Берджи площадью захвата 1/40 м²) в двух повторностях с последующей промывкой грунта через сито № 28 (ячея 0,084 мм) на каждой из исследуемых станций. Фиксация проводилась 40% формалином из расчёта концентрации его в пробе 4%. Подсчёт организмов осуществлялся с использованием бинокля Zeiss Stemi DV4, видовое определение – с помощью микроскопа Zeiss PrimoStar. Взвешивание макрозообентоса проводили на торсионных весах с точностью 0,1 мг. Рассчитывались численность (экз./м²) и биомасса (г/м²). Наряду с макробентосными организмами отдельно учитывался мейозообентос. Для определения биомассы последнего использовались эмпирические расчёты по формуле зависимости массы тела от его длины [Курашов, 2007]. Определение таксономической принадлежности организмов проводилось по руководствам [Определитель зоопланктона..., 2016]. Для оценки степени влияния деятельности форелевого хозяйства на донную биоту и качество воды использовались рекомендуемые (ГОСТ 17.1.3.07–82³) биоиндикаторные индексы: индекс Вудивисса и олигохетный индекс, хорошо зарекомендовавшие себя, в том числе, для оценки органических загрязнений [Шитиков и др., 2005].

¹ Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях на пресноводных водоёмах. Зоопланктон и его продукция. 1982. / Салазкин А.А., Иванова М.Б., Огородникова В.А. (сост.). Л. 33 с.

² Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях. Зообентос и его продукция. 1983. Л.: ГосНИОРХ, 51 с.

³ ГОСТ 17.1.3.07–82 Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоёмов и водотоков.

Статистическая обработка полученных данных проводилась с использованием программы Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Сообщества бактерий района размещения рыбоводных садковых хозяйств

В придонном слое воды с внешней стороны садка форелевого хозяйства 1, расположенного в шхерах Якимварского залива вблизи г. Лахденпохья (ст. Коко5), общая численность бактериопланктона в начале июня 2022 г. составляла 8,27 млн кл/мл. В воде обнаруживалось большое количество детрита (рис. 2 А) и значительная обсеменённость частиц микроорганизмами. Поэтому, количество прикреплённых к частицам и свободноживущих бактерий подсчитывали отдельно. Выяснилось, что свободноживущие бактерии присутствовали в очень малых количествах по сравнению с прикреплёнными – 0,17 млн кл/мл и 8,10 млн кл/мл соответственно (табл. 1). В придонной воде контрольной станции (ст. Коко7), расположенной на расстоянии примерно одного километра от ст. Коко5 по направлению к открытому озеру, взвеси в воде было гораздо меньше, а численность микроорганизмов уменьшалась почти в 4 раза (2,17 млн кл/мл). Поскольку количество взвеси было невелико, ми-

кроорганизмы не разделяли на прикреплённые и свободноживущие. Бактериопланктон садков был весьма многообразен (рис. 2 А-Д). Микробный пейзаж на ст. 7 был более однообразным, а размеры бактериальных клеток были меньше, нежели под садками (рис. 2 Е, табл. 1).

В придонном горизонте воды садка форелевого хозяйства в Сортавальских шхерах (ст. Сорт 1) общая численность бактериопланктона составляла 2,80 млн кл/мл. Сильной обсеменённости частиц взвеси микроорганизмами не наблюдалось, поэтому свободноживущие и прикреплённые бактерии отдельно не подсчитывались. На расстоянии 850 м от садка по направлению к выходу из шхер на контрольной станции (ст. Сорт 13) концентрация бактериопланктона достигала 2,34 млн кл/мл. Микробные пейзажи под микроскопом, на обеих станциях, практически не отличались друг от друга (рис. 3 А-Е). В обеих пробах бактериоценозы, в основном, состояли из небольших палочек и кокков. В воде из садка иногда встречались крупные палочки (7–8 мкм) (рис. 3 А, В), а на ст. Сорт 13 спириллы (рис. 3 Б, Г).

Численность бактерий непосредственно под садками форелевого хозяйства близ г. Лахденпохья значительно превосходила величины, характерные для шхерных районов Ладожского озера, что свидетель-

Таблица 1. Общая численность бактерий (ОЧБ) в воде форелевых хозяйств, расположенных в Лахденпохских и Сортавальских шхерах

Table 1. Total bacterial counts in the water of trout farms located in the Jakimvar and Sortavala skerries

Станция	Общая численность бактериопланктона, млн кл /мл	Комментарии
Лахденпохья ст. Коко5 Садок	Свободноживущие бактерии: 0,17 Бактерии, прикреплённые к частицам взвеси: 8,1	Детрит занимает около 80% площади поля зрения микроскопа (рис. 2 А). Основная часть бактерий была представлена палочковидными формами длиной 1,5–3,5 мкм (43,6%) и кокковидными формами диаметром 0,5–0,7 мкм (47,5%). Однако, встречались цепочки палочек длиной 2,5–3,0 мкм (~3,0%), длинные толстые палочки размером 2,5 x 6–8 мкм (~2,5%), спириллы длиной 25–30 мкм (~1%), высшие актинобактерии размером до 90 мкм (~2,4%) (рис. 2 Б-Д)
Лахденпохья ст. Коко7 На расстоянии примерно 1000 м от садка	2,17	Детрит занимает около 2,5% площади поля зрения микроскопа (рис. 2). Микроорганизмы, преимущественно, были представлены палочковидными формами длиной 1,5–2,0 мкм (41,8%) и кокками диаметром 0,3–0,6 (58,2%) (рис. 2 Е). Изредка встречались спириллы (менее 1%)
Сортавала 1 ст. Сорт1 Садок	2,80	Детрит занимает около 30–40% площади поля зрения микроскопа. Микроорганизмы, в основном, представлены палочковидными формами длиной 1,5–3,0 мкм (42,8%) и кокками диаметром 0,5–0,8 мкм (~ 51,7%). Встречались цепочки крупных палочек, размером 1,5 x 7–8 мкм (~ 4,5%) (рис. 3 А, В, Д). Иногда встречались спириллы длиной 15–20 мкм (~ 1%) (рис. 3 А, В, Д)
Сортавала 13 ст. Сорт13 На расстоянии примерно 850 м от садка	2,34	Детрит занимает 3–5% площади поля зрения микроскопа. Микроорганизмы представлены палочковидными формами длиной 0,5–2,0 мкм (35,6%) и кокками диаметром 0,5–0,8 мкм (63,9%). Крайне редко встречались спириллы длиной 10–12 мкм (менее 0,5%) (рис. 3 Б, Г, Е)

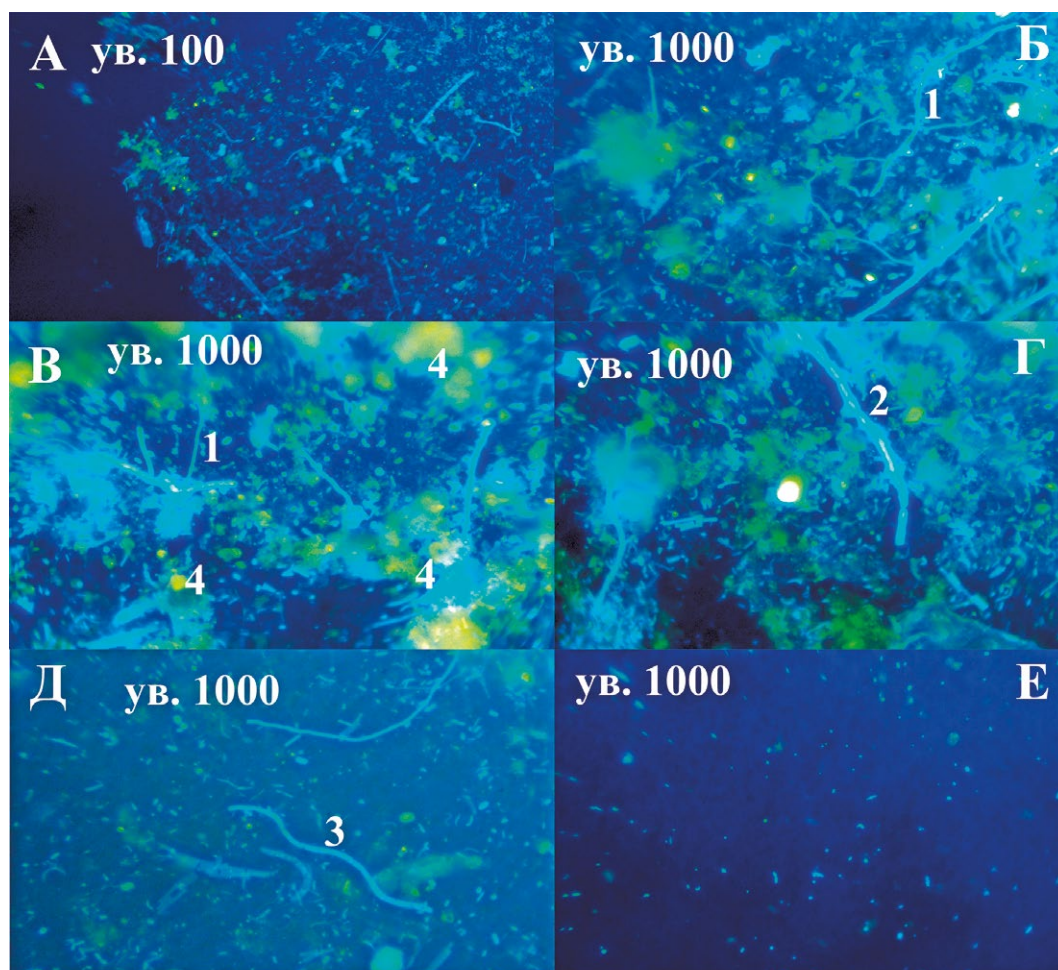


Рис. 2. Микробный пейзаж на ст. Коко5 (А-Д) (садки) и ст. Коко7 (Е) (контроль) форелевого хозяйства 1 в районе г. Лахденпохья: А – ув. $\times 100$, Б-Е – ув. $\times 1000$; 1 – высшие актинобактерии; 2 – цепочка из крупных палочек; 3 – спирилла; 4 – частицы детрита

Fig. 2. Microbial landscape at the sampling stations Koko5 (A-D) (cages) and Koko7 (E) (control) of trout farm 1 in the area of Lahdenpohja: A – magnification $\times 100$, Б-Е – magnification $\times 1000$. 1 – higher Actinobacteria; 2 – a chain of large rods; 3 – spirilla; 4 – detritus particles

ствуется о снижении качества воды на акватории хозяйства. Водные массы в непосредственной близости от садка по общей численности бактериопланктона можно квалифицировать как «грязные» [ГОСТ 17.1.3.07–82⁴; Руководство по методам..., 1982⁵]. На расстоянии 1000 м от садка на контрольной станции (ст. Коко7) количественный уровень развития бактериопланктона существенно снижался и являлся нормальным для данных районов в конце июня [Капустина, Митрукова, 2021], когда воды характеризовались как «умеренно загрязненные». [ГОСТ 17.1.3.07–82⁴; Руководство по методам ..., 1982¹], т. е. на таком расстоянии от хозяй-

ства значимого отрицательного воздействия на качество воды не обнаруживалось. В Сортавальских шхерах величины общей численности микроорганизмов непосредственно под садком и на значительном от него расстоянии (850 м, контрольная ст. Сорт 13) были близки между собой и сравнимы или меньше аналогичных величин, характерных для этого района в летний период [Белозерова, Капустина, 2020; Капустина, 2022; неопубликованные данные]. Таким образом, отчетливого повышения концентрации микроорганизмов на акватории садка не наблюдалось и негативного влияния форелевого хозяйства на акваторию, где расположена контрольная станция (ст. Сорт 13) не прослеживалось. На станциях Сорт 1 и Сорт 13 водные массы по величинам общей численности бактериопланктона можно охарактеризовать как «умеренно загрязненные» [ГОСТ 17.1.3.07–82⁴; Руководство по методам..., 1982¹].

⁴ ГОСТ 17.1.3.07–82. 1982. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. М.: Издательство стандартов. 8 с.

⁵ Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. 1982. / Под ред. В.А. Абакумова. М.: Гидрометеоиздат. 56 с.

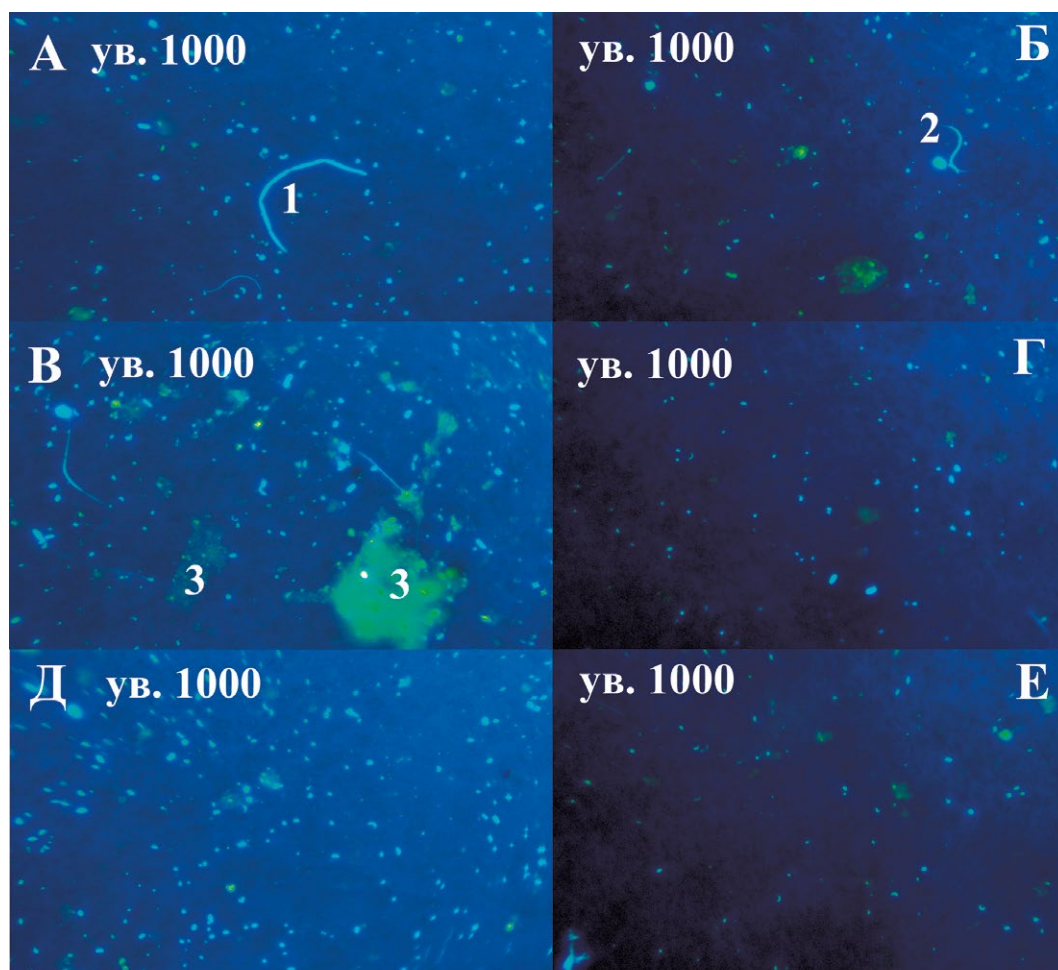


Рис. 3. Микробный пейзаж на ст. Сорт 1 (А, В, Д) (садки) и на ст. Сорт 13 (Б, Г, Е) (контроль) форелевого хозяйства 1 в районе г. Сортавала (ув. $\times 1000$). 1 — цепочка из длинных палочек; 2 — спириллы; 3 — частицы детрита

Fig. 3. Microbial landscape at the sampling stations Sort1 (А, В, Д) (cages) and Sort13 (Б, Г, Е) (control) of trout farm 2 in the area of Sortavala. А-Е — magnification $\times 1000$. 1. — a chain of long rods; 2. — spirilla; 3. — detritus particles

Аквакультура, как правило, вызывает образование большого количества взвеси, богатой органическими веществами, которая является местом обитания бактерий. В связи с этим, обычно, происходит значительное увеличение численности бактерий на акваториях самих рыбоводных хозяйств и на близлежащих участках по сравнению с фоновыми значениями, а также изменение качественных характеристик бактериоценозов [Carr, Goulder, 1993; Киреева, 2014; Ускова и др., 2019]. Например, в нагульном пруду ДВSRП (Державне виробниче сільськогосподарсько — рибоводне підприємство (укр.), Государственное производственное сельскохозяйственно-рыбоводное предприятие, перевод с укр.) «Лиманский рыбхоз» с началом процесса кормления рыб (1 декада июня) отмечалось резкое повышение численности бактериопланктона в зоне кормовых дорожек с 0,38 млн кл/мл (до начала кормления) до 2,56 млн

кл/мл, что превышало аналогичную величину в открытой зоне пруда почти в 4 раза [Киреева, 2014]. Примерно такая же картина наблюдалась в районе форелевого хозяйства в шхерах Якимварского залива, где общая численность бактерий в садке превышала таковую на расстоянии километра от садка в 3,8 раз. В форелевом хозяйстве в Сортавальских шхерах и на участке, отстоящем на 850 м, такой тенденции не наблюдалось. Это может быть результатом влияния следующих абиотических факторов: морфометрические особенности бухты в Якимварских шхерах (первое форелевое хозяйство), препятствующие перемешиванию водных масс в бухте; сильные течения в протоке Сортавальских шхер, где расположено второе форелевое хозяйство, обеспечивающие значительную проточность системы в отличие от шхер Якимварского залива.

2. Разнообразие и количественные показатели сообщества зоопланктона в районе размещения рыбоводных садковых хозяйств

В составе зоопланктона исследованной акватории в районе хозяйства 1 у г. Лахденпохья отмечено 29 таксонов, на акватории хозяйства 2, у г. Сортавала – 26 таксонов. В целом, таксономический состав хозяйств был сходен. Комплекс массовых видов зоопланктона включал типичные пресноводные формы: коловраток *Asplanchna priodonta*, *Conochilus unicornis*, *Polyarthra dolichoptera*, *Kellicottia longispina*, *Keratella cochlearis*, *Synchaeta stylata*; ветвистоусых ракообразных *Bosmina longirostris*, *Chidorus sphaericus*, *Limnospila frontosa*; веслоногих ракообразных *Eudiaptomus gracilis*, *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides*, *Cyclops strenuus*, *Acanthocyclops vernalis*, *Limnocalanus macrurus*. Кроме того, в хозяйстве 2 единично встречен американский чужеродный вид из группы коловраток – *Kellicottia bostoniensis* (Rousselet, 1908).

Для толщи воды в хозяйстве 1 видовая структура сообщества изменялась по станциям от 19 до 21 таксона, а численность и биомасса планктеров варьировали от 9,07 до 14,70 тыс. экз./м³ и от 0,088 до 0,232 г/м³, соответственно (табл. 2). Большим видовым

обилием и количественными значениями характеризовалась станция Коко7 (на удалении порядка 1 км), меньшими – станция Коко5 (у садков). В хозяйстве 2 у г. Сортавала в толще воды видовая структура сообщества изменялась по станциям от 7 до 16 таксонов, при этом минимум отмечен на дальней от садков (порядка 1 км) станции Сорт 13, максимум – на станции Сорт 4, расположенной в 100 м от садков. Численность планктеров изменялась от 1,61 до 5,23 тыс. экз./м³, биомасса – 0,080 до 0,148 г/м³, с высокими значениями на станции Сорт4, а станции Сорт 1 и Сорт 13 характеризовались минимальными показателями (табл. 2).

Для хозяйства 1 в целом, при удалении от садков форелевого хозяйства, отмечалось увеличение доли веслоногих с 49,9 до 60,6% в общей численности зоопланктона и, наоборот, уменьшение доли коловраток с 43,6 до 26,8%, при этом общая численность сообщества увеличивалась в 1,6 раза. В биомассе наблюдалась схожая картина. При удалении от садков форелевого хозяйства увеличивалась доля веслоногих с 72,4 до 83,8% и уменьшалась доля коловраток с 23,2 до 6,6%, при этом общая биомасса планктеров увеличивалась почти в 3 раза. Вклад ветвистоусых рачков в общие показатели сообщества был невысоким, при

Таблица 2. Численность (N – тыс. экз./м³) и биомасса (B – г/м³) зоопланктона в районе исследованных форелевых хозяйств, июнь 2022 г.

Table 2. The number (N – thousand ind./m³) and biomass (B – g/m³) of zooplankton in the trout farming area, June 2022

Станции	Rotifera		Cladocera		Copepoda		Bcero	
	толща воды							
	N	B	N	B	N	B	N	B
Коко5 (садки)	3,96	0,020	0,58	0,004	4,53	0,063	9,07	0,088
Коко4 (фон)	1,64	0,002	1,01	0,019	3,45	0,071	6,10	0,091
Коко7 (фон)	4,27	0,015	1,52	0,022	8,90	0,194	14,70	0,232
придонный слой								
Коко5 (садки)	0,40	<0,001	–	–	0,41	0,007	0,81	0,007
Коко4 (фон)	0,15	0,002	0,05	0,001	0,26	0,003	0,46	0,006
Коко7 (фон)	0,06	<0,001	0,02	<0,001	0,08	0,002	0,16	0,002
толща воды								
Сорт1 (садки)	1,02	0,005	0,02	0,001	1,17	0,075	2,21	0,080
Сорт4 (фон)	1,48	0,003	0,24	0,007	3,51	0,138	5,23	0,148
Сорт13 (фон)	–	–	0,66	0,007	0,95	0,074	1,61	0,081
придонный слой								
Сорт1 (садки)	0,26	0,001	0,01	0,000	0,29	0,006	0,55	0,007
Сорт4 (фон)	0,15	0,000	–	–	0,25	0,004	0,41	0,004
Сорт13 (фон)	0,22	0,000	0,01	0,000	0,26	0,016	0,49	0,016

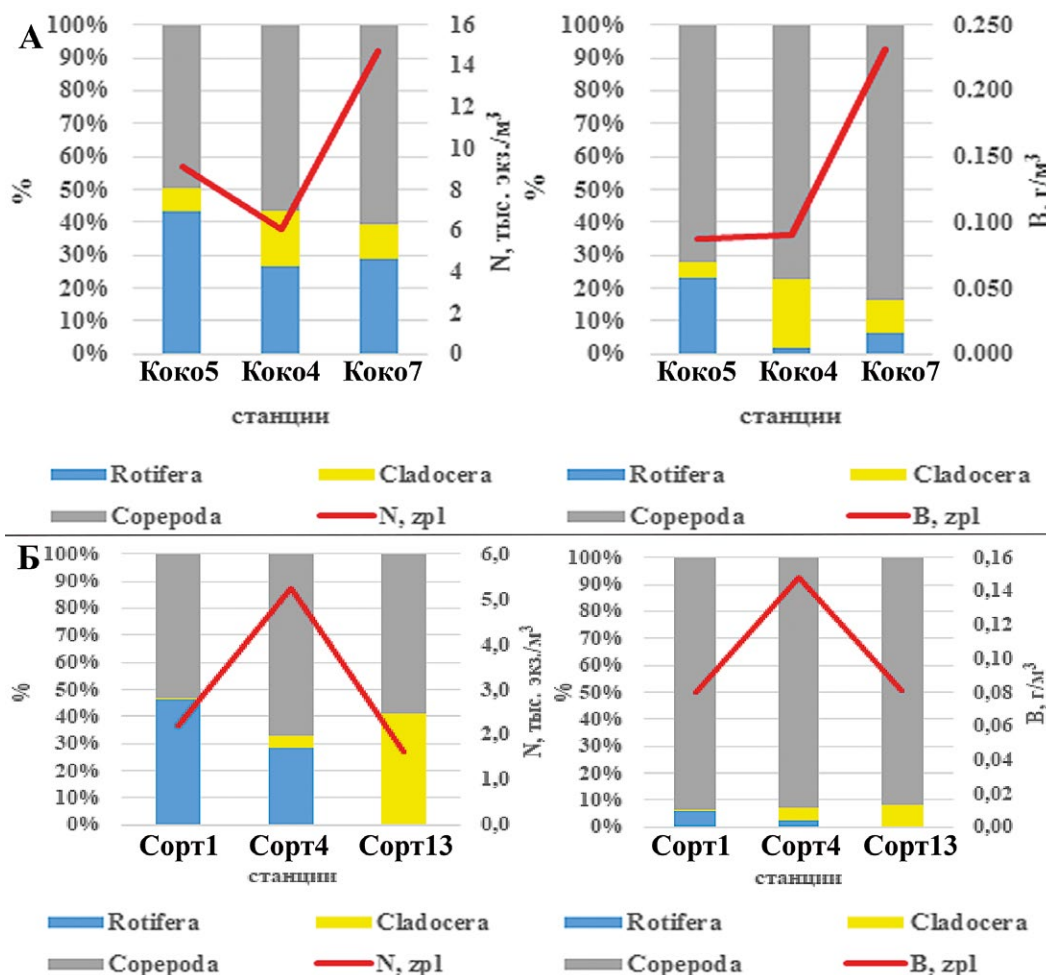


Рис. 4. Доля (%) основных групп зоопланктона в водной толще, общая численность и биомасса (N и B) зоопланктона (zpl) на исследованных станциях в толще воды в районе форелевых хозяйств (А – хозяйство 1 у г. Лахденпохья, Б – хозяйство 2 у г. Сортавала), июнь 2022 г.

Fig. 4. The share (%) of the main zooplankton groups in the water column, the total number and biomass (N and B) in the water column of the studied stations in the trout farming area (А – farm 1 in Lahdenpohja, Б – farm 2 in Sortavala), June 2022

этом минимальные значения отмечены также в районе садков (рис. 4 А).

Для хозяйства 2 при удалении от садков, отмечалось увеличение доли ракообразных в общей численности зоопланктона. Особенно ярко это прослеживалось у ветвистоусых, являющихся фильтраторами. Так, доля веслоногих увеличивалась с 53,2 до 67,1%, а ветвистоусых с 0,7 до 41,2%. Среди коловраток наблюдались обратные изменения – их доля уменьшалась с 46,1% у садков вплоть до полного отсутствия на станции, расположенной в 1 км. В биомассе зоопланктона преобладали веслоногие, распределение которых по станциям было равномерным (91,5–93,3%). Вклад ветвистоусых рачков и коловраток в формирование биомассы сообщества был несущественным. Тем не менее, прослеживалось увеличение доли ветвистоусых при удалении от садков и уменьшение доли коловраток в том же направлении (рис. 4 Б).

Состояние зоопланктона придонного слоя отличалось от такового в толще воды. В хозяйстве 1 состав зоопланктона изменялся по станциям от 8 до 20 таксонов, в хозяйстве 2 – от 8 до 19 таксонов. При этом, если в хозяйстве 1 минимум таксонов отмечен у садков (Коко5), а максимум – на самой дальней станции (Коко7), то в хозяйстве 2 картина была противоположной.

Показатели численности и биомассы в придонном слое были сравнительно низкими. В хозяйстве 1 численность планктеров изменялась от 0,16 до 0,81 тыс. экз./м³, биомасса – 0,002 до 0,007 г/м³ (табл. 2). Большими значениями характеризовалась станция у садков (Коко5), меньшими – расположенная в 1 км (Коко7). В хозяйстве 2 численность планктеров варьировала от 0,41 до 0,55 тыс. экз./м³, биомасса – от 0,004 до 0,016 г/м³ (табл. 2). При этом большая численность отмечена у садков (Сорт1), а биомасса – на

дальней станции (Сорт13). Самыми низкими количественными значениями зоопланктона характеризовалась станция Сорт4, удалённая от садков на 100 м.

При удалении от садков хозяйства 1 для численности всех групп зоопланктона прослеживалось 5-кратное её снижение. Доля ракообразных при удалении от садков увеличивалась, а доля коловраток уменьшалась (рис. 5 А). Биомасса зоопланктона, при удалении от садков, также снижалась в 3,5 раза. По всей акватории её основу составляли веслоногие с большей долей (97,7%) в районе садков, где отсутствовали ветвистоусые, и отмечена самая низкая доля коловраток (2,3%). При этом на станции, расположенной в ~100 м от садков, доля ветвистоусых в общей биомассе составила 20,3%, а коловраток – 25,6% (рис. 5 А).

Для придонного слоя хозяйства 2 изменения по станциям в численности зоопланктона были незначительны (не более чем в 1,3 раза). Распределение долей преобладающих групп (веслоногие от 52,2–62,2% и коловратки от 37,8–46,9%) по станциям было почти равномерным, разница в соотношении каждой группы по станциям не превышала 10%. В биомассе сообщества прослеживалось уменьшение доли коловраток при удалении от садков и увеличение доли веслоногих (рис. 5 Б). В районе садков в малом количестве отмечены коловратки – индикаторы загрязнённых вод: α -р сапроб – *Rotaria neptunia* и β - α сапроб – *Filinia longiseti*. Вклад ветвистоусых рачков в формирование биомассы сообщества был минимален.

Таким образом, анализ показателей зоопланктонного сообщества выявил, что наиболее выраже-

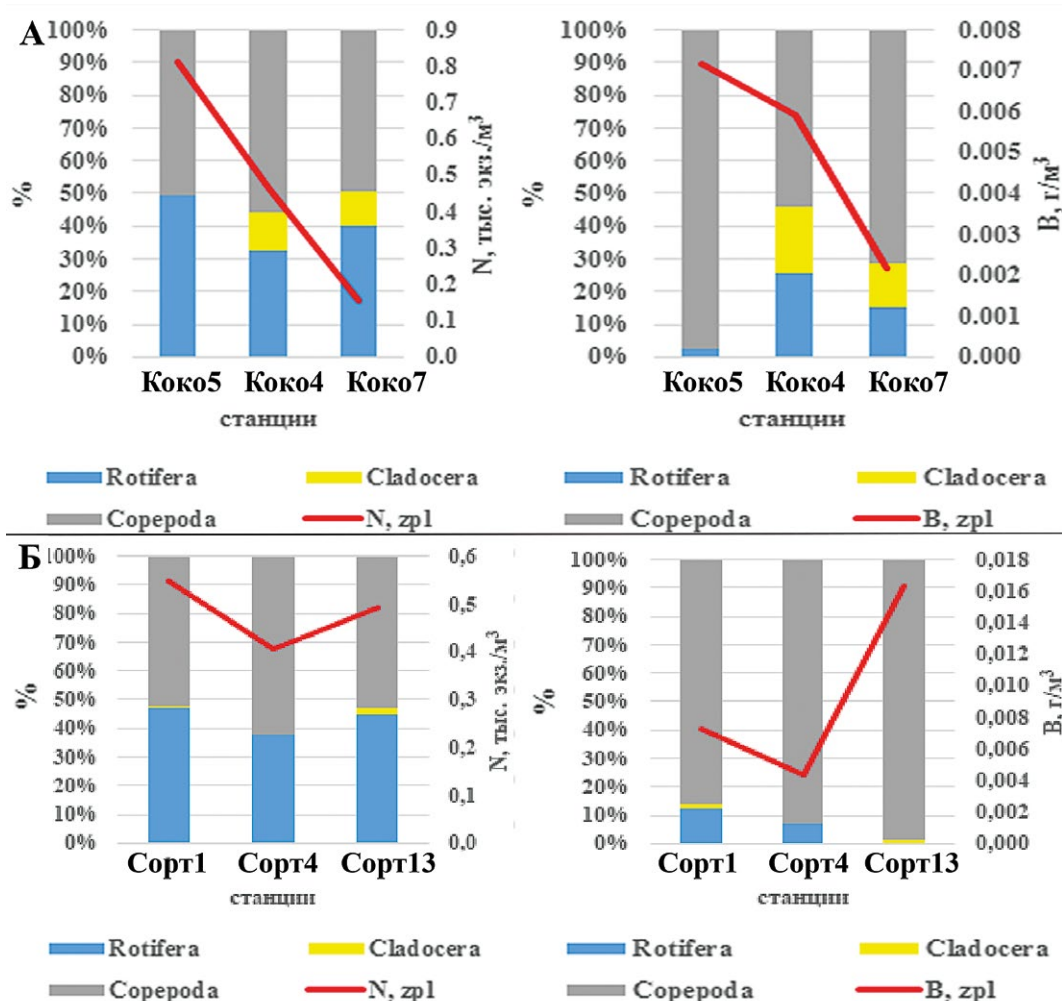


Рис. 5. Доля (%) основных групп зоопланктона в придонном слое, общая численность и биомасса (N и B) зоопланктона (zpl) на исследованных станциях в придонном слое воды в районе форелевых хозяйств (А – хозяйство 1 у г. Лахденпохья, Б – хозяйство 2 у г. Сортавала), июнь 2022 г.

Fig. 5. The share (%) of the main zooplankton groups in the bottom layer of water, the total number and biomass (N and B) in the bottom layer of water of the studied stations in the trout farming area (A – farm 1 in Lahdenpohya, Б – farm 2 in Sortavala), June 2022

но наличие негативного влияния в придонном слое воды. Последнее подтверждалось для хозяйства 1 уменьшением общего видового состава зоопланктона по сравнению с толщей воды, более чем в 2 раза, и полным отсутствием на ст. Коко5 группы ветвистоусых рачков, являющихся фильтраторами. Однако для хозяйства 2, напротив, этот показатель вырос. Увеличение количества видов в придонном слое у садков форелевого хозяйства может свидетельствовать о поступлении биогенных веществ (в концентрациях ниже летальных), способствующих развитию видов, потребляющих органическое вещество, что подтверждается присутствием индикаторов загрязнённых вод: α -р сапроба – *Rotaria neptunia* и β - α – *Filinia longiseta*.

В целом, негативное воздействие форелевых хозяйств на зоопланктон выражалось в снижении общего видового разнообразия и количественных показателей сообщества, присутствии видов-индикаторов органического загрязнения. Это соответствует известным фактам изменения зоопланктонного сообщества под влиянием органического загрязнения в других водоёмах [Батурина и др., 2015; Кучко, 2004; Кучко, Савосин, 2020; Фомина и др., 2019].

3. Разнообразие и количественные характеристики сообществ макро- и мейозообентоса в районе размещения рыбоводных садковых хозяйств

Всего на исследованных станциях форелевых хозяйств под садками и на удалении от них встречено 12 видов макрозообентоса из четырёх крупных таксонов: Nematoda, Chironomidae, Oligochaeta и Amphipoda. Доминантами на станциях, расположенных на удалении от садков, в обоих хозяйствах выступали массовые виды олигохет (*Lamprodrilus* sp.,

Spirosperma ferrox, *Lumbriculus variegatus*). К массовым видам хирономид относились *Chironomus plumosus*, *Procladius* sp. и *Cryptochironomus defectus*. Единично встречались глубоководные виды амфипод – *Monoporeia affinis* и *Pallasiopsis quadrispinosa*. Под садками сообщество макрозообентоса сильно обеднено – встречены только хирономиды (1 вид семейства Orthoclaadiinae). Численность и биомасса макрозообентоса в районе садков была ниже по сравнению с удалёнными от садков станциями (табл. 3).

В отношении мейозообентоса наблюдалась схожая ситуация. На исследуемых участках встречено 20 видов из 8 крупных таксонов: Nematoda, Chironomidae, Oligochaeta, Harpacticoida, Cyclopoida, Ostracoda, Cladocera, и Turbellaria. Из них в зоне форелевых хозяйств – 3 вида (Nematoda sp., Tubificidae gen.sp. juv. без волосных щетинок, Turbellaria sp.). Комплекс массовых видов мейозообентоса включал типичные пресноводные формы: нематод (видовое определение не проводилось), ювенильные формы олигохет (наибольшая встречаемость отмечена для тубифицид из группы видов без волосных щетинок) и хирономид семейства Orthoclaadiinae, веслоногих ракообразных *Attheyella crassa*, *Mesocyclops leuckarti*, *Thermocyclops oithonoides* и *Paracyclops fimbriatus*, остракод *Cytherissa lacustris* и *Candona* sp., турбеллярий. Единично встречались ветвистоусые ракообразные рода *Alona* и *Macrothrix*. Численность и биомасса мейобентоса вблизи садков хозяйства 2 (у г. Сортавала) были ниже, чем на фоновых станциях, а в хозяйстве 1 (у г. Лахденпохья) организмы мейобентоса отсутствовали (табл. 4).

Отмечено увеличение роли мелкоразмерного бентоса – мейозообентоса по мере приближения к форелевым хозяйствам (по показателям: отношение

Таблица 3. Численность (экз./м²) и биомасса (мг/м²) макробентоса на исследованных станциях

Table 3. The number (exz./m²) and biomass (mg/m²) of macrobenthos at the studied stations

	Nematoda		Oligocheta		Chironomidae		Amphipoda		Bcero	
	N	B	N	B	N	B	N	B	N	B
Коко5 (садки)	–	–	–	–	20	10	–	–	20	10
Коко4 (фон: 430 м от центральных садков)	–	–	360	360	40	40	–	–	400	400
Коко7 (фон: 1000 м от центральных садков)	140	20	540	770	700	320	40	110	1420	1220
Сорт1 (садки)	–	–	–	–	20	50	–	–	20	50
Сорт4 (фон: 130 м от центральных садков)	–	–	100	410	60	240	20	160	180	810
Сорт13 (фон: 835 м от центральных садков)	450	10	180	640	–	–	20	70	650	720

Таблица 4. Численность (экз./м²) (над чертой) и биомасса (мг/м²) (под чертой) мейобентоса на исследованных станциях
Table 4. The number (ind./m²) (above the line) and biomass (mg/m²) (below the line) of meiobenthos at the studied stations

	Nematoda	Oligochaeta	Chironomidae	Harpacticoida	Ostracoda	Cyclopoida	Turbellaria	Bcero
Коко5 (садки)	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Коко4 (фон)	1040	40	40	0	0	260	0	1740
	0,52	10,38	1,89	0,00	0,00	2,64	0,00	27,27
Коко7 (фон)	1800	120	240	160	480	460	40	3320
	1,57	17,12	38,19	0,78	6,44	6,89	0,48	71,77
Сорт1 (садки)	60	20	0	0	0	0	20	100
	0,08	9,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	10,03
Сорт4 (фон)	240	20	0	0	60	20	0	340
	0,28	3,53	0,00	0,00	3,59	0,64	0,00	8,05
Сорт13 (фон)	220	60	120	0	0	20	40	480
	0,10	21,14	8,15	0,00	0,00	0,74	0,33	30,93

численности мейобентоса к численности макрозообентоса и отношение биомассы первого к биомассе второго) (табл. 5).

Таблица 5. Изменение соотношения численности и биомассы мейобентоса к макрозообентосу в зависимости от удалённости от форелевых хозяйств

Table 5. Change in the ratio of abundance and biomass of meiobenthos and macrozoobenthos depending on the distance to trout farms

	Nмейо/Nмакро	Вмейо/Вмакро
Коко5 (садки)	–	–
Коко4 (фон)	3,31	0,043
Коко7 (фон)	1,97	0,056
Сорт1 (садки)	5,00	0,201
Сорт4 (фон)	2,64	0,030
Сорт13 (фон)	1,83	0,045

Таким образом, при удалении от садков происходило изменение структуры сообщества и её усложнение (рис. 6). Структурное разнообразие в обоих хозяйствах увеличивалось: на наиболее удалённых от садков станциях число крупных таксонов было максимальное.

Полученные количественные данные говорят о достаточно угнетенном состоянии зообентоса на участках акватории непосредственно под рыбодными садками. Оценка качества воды по показателю индекса Вудивисса (BI) показала его значительное снижение по сравнению с наиболее удалёнными фоновыми участками в обоих хозяйствах. Значения BI изменялись от 4 (на фоновых станциях) до 1 (на станциях под садками) [Руководство..., 1983²]. Для север-

ных глубоководных пресных водоёмов для оценки влияния на качество водной среды рыбодных хозяйств предлагается использовать чувствительную к загрязнениям реликтовую амфиподу *Monoporeia affinis* [Савосин, 2010; Стерлигова и др., 2019]. В наших исследованиях для обоих хозяйств было отмечено присутствие этого вида только на станциях, максимально удалённых от садков (ст. Коко7 и Сорт 13). Это свидетельствует в пользу возможности использования сведений о присутствии этого вида для индикации загрязнения форелевыми хозяйствами акваторий Ладожского озера. Требуется дальнейшее накопление данных о распределении монопорей в районе рыбодных садков и прилегающих к ним участках акватории.

Закономерности, полученные нами для хозяйств Ладожского озера, согласовались с данными для других водоёмов. Предыдущие исследования показали, что условия пресноводных водоёмов, с ограничением возможности выноса загрязняющих веществ, создают условия для особо сильного антропогенного пресса на донную биоту озёр. Негативное влияние форелевых хозяйств на состояние бентосных сообществ распространялось на десятки, редко – полторы сотни метров от садков. Согласно литературным данным, в загрязнённых донных отложениях сокращается видовое разнообразие бентоса (вплоть до полного исчезновения бентосных организмов под садками). Доминировать начинают виды, устойчивые к загрязнениям (олигохеты, нематоды и личинки некоторых видов хирономид), тогда как менее устойчивые таксоны исчезают, наблюдается снижение численности и биомассы [Савосин, 2010; Михайленко, Стерлигова, 2021; Farabi et al., 2022; Kalantzi, Karakassis, 2006;

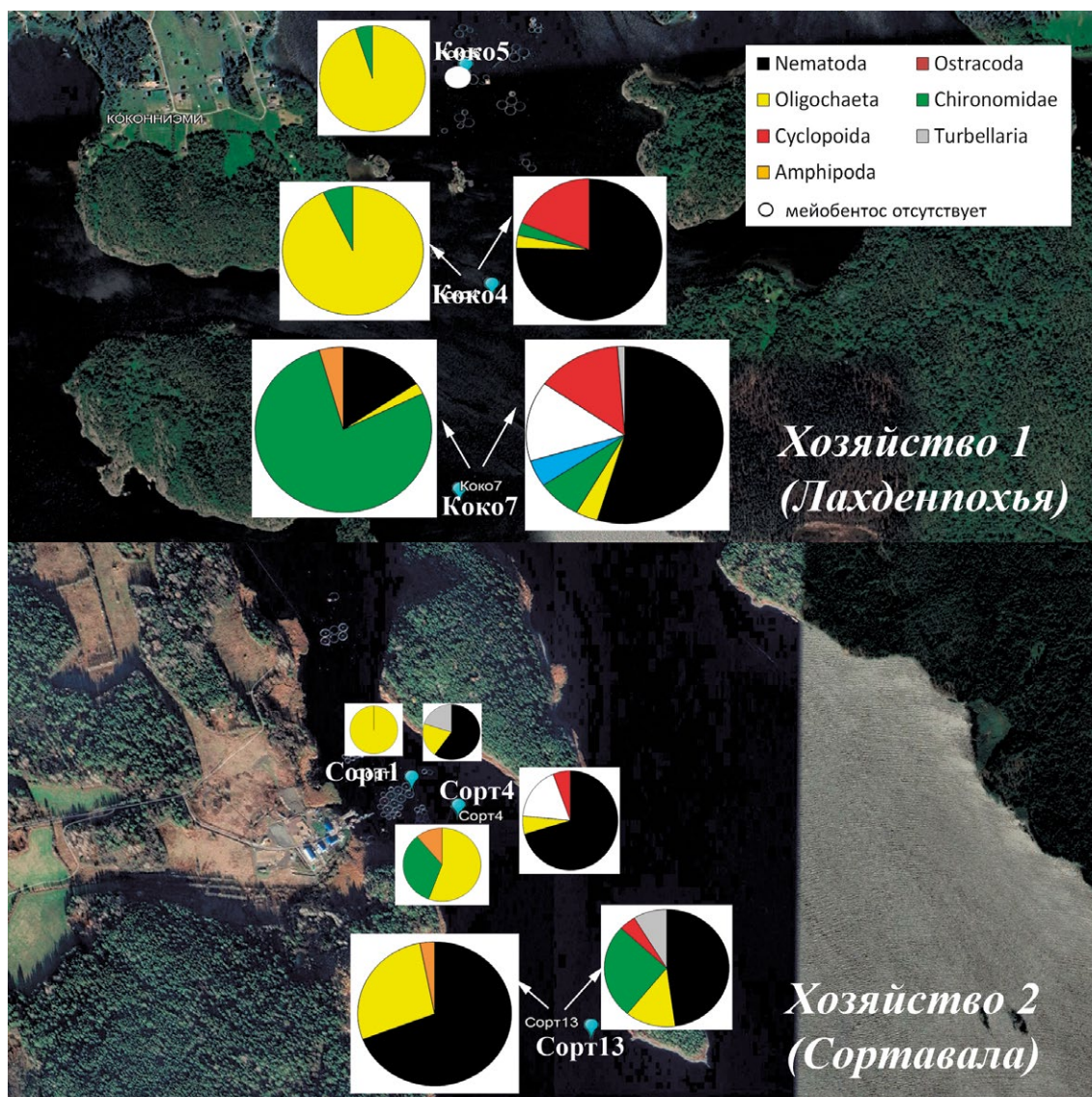


Рис. 6. Структура численности макробентосного (левые диаграммы) и мейобентосного (правые диаграммы) сообщества под садками и на фоновых участках в исследованных хозяйствах

Примечание: размер круговых диаграмм пропорционален общей численности бентоса на данной станции

Fig. 6. Structure of the number of macrobenthos (left diagrams) and meiobenthos (right diagrams) communities under cages and at background sites in the area of studied farms

Note: the size of the pie charts is proportional to the total number of benthos at this station

Rooney, Podemski, 2009]. Степень загрязнения связана с интенсивностью внесения органического вещества с кормами и фекалиями рыб в садках, а также гидродинамическими особенностями места расположения хозяйств [Михайленко, Стерлигова, 2021; Villnas et al., 2011]. Для оценки потенциала восстановления водной среды после прекращения деятельности форелевых хозяйств следует учитывать данные аспекты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано три типа биологических сообществ, позволяющих отслеживать как краткосрочные, так

и долгосрочные последствия деятельности форелевых хозяйств. Судя по величинам общей численности бактериопланктона, в разных форелевых хозяйствах отмечалось существенное (форелевое хозяйство 1) и несущественное (хозяйство 2) повышение уровня развития бактериального сообщества в зоне под садками по сравнению с удалёнными фоновыми участками. Подобная закономерность отмечена и для придонного зоопланктона. Особенно выраженная положительная связь между этими двумя сообществами проявлялась для хозяйства 1 у г. Лахденпохья. Объяснение этому возможно кроется в трофических связях между

бактериями и зоопланктонными организмами, среди которых в придонных слоях под садками отмечалось доминирование коловраток, а также некоторых видов и возрастных форм веслоногих, потребляющих бактерий. Таким образом, повышение концентрации органического вещества, являющее одним из значимых последствий деятельности форелевых хозяйств, создаёт предпосылки для усиления роли этих связанных между собой сообществ гидробионтов. Однако, органическое вещество в высоких концентрациях, может обладать токсическими свойствами, что проявлялось в угнетении развития бентоса, вплоть до его полного исчезновения на некоторых участках, а также сопровождалось упрощением структуры бентосного сообщества и сохранением исключительно видов, устойчивых к органическому загрязнению. Следует заметить, что в видовом составе зоопланктона придонного слоя также было отмечено появление видов-индикаторов загрязнённых вод. Менее однозначно интерпретируемая ситуация была при анализе зоопланктона толщи воды над исследуемыми станциями. В одном хозяйстве (форелевое хозяйство 1) отмечено снижение численности и биомассы зоопланктона в зоне под садками, тогда как в другом (форелевое хозяйство 2) наблюдалась противоположная картина. По всей вероятности, существовали дополнительные факторы, определявшие такие различия.

Исследованные хозяйства имели существенные различия в особенностях гидродинамических процессов: если хозяйство 1 у г. Лахденпохья размещалось в относительно закрытой бухте с затруднённым водообменом, то хозяйство 2 у г. Сортавала находилось в условиях с высокой проточностью. Можно предположить, что более выраженные изменения в характеристиках изученных сообществ, проявившиеся для первого хозяйства, связаны, в первую очередь, с гидродинамическим фактором и более существенным накоплением органического вещества, влияющего на перестройку экосистемы в целом.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность Лапенкову А.Е. и Гузевой А.В., м. н. с. лаборатории географии и гидрологии и м. н. с. лаборатории комплексных проблем лимнологии ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, за неоценимое содействие в организации и проведении полевого этапа настоящего исследования, в т. ч. помощь в отборе проб и предоставлении оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Результаты исследования бентоса и зоопланктона выполнены за счёт средств гранта РФФИ 23–24–00202 «Сезонная динамика геохимических характеристик донных отложений и биологических сообществ природных водоёмов в зоне влияния садковых форелевых хозяйств». Исследование бактериопланктона проведено в рамках государственного задания Института озероведения РАН, обособленного структурного подразделения СПб ФИЦ РАН, по теме FMNG-2019–0001 «Комплексная оценка динамики экосистем Ладожского озера и водоёмов его бассейна под воздействием природных и антропогенных факторов».

ЛИТЕРАТУРА

- Батурина М.А., Кононова О.Н., Рафиков Р.Р. 2015. Состояние сообществ водных беспозвоночных (планктон, бентос) в условиях эксплуатации в водоёме форелевого хозяйства // Популяционная экология. № 4. С. 84–89.
- Белозерова Д.В., Капустина Л.Л. 2020. Санитарно-микробиологическая характеристика среды обитания водных биоресурсов в Ладожском озере // Труды ВНИРО. Т. 185. С. 94–104. DOI: 10.36038/2307–3497–2021–185–94–104.
- Капустина Л.Л., Митрукова Г.Г. 2021. Бактериопланктон // Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата / Кондратьев С.А., Поздняков Ш.Р., Румянцев В.А. ред. М.: РАН. С. 323–336.
- Киреева И.Ю. 2014. Общая характеристика бактериопланктона в нагульном пруду ДВСРП «Лиманский рыбхоз» // Приволжский научный вестник. № 10 (38). С. 9–11.
- Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. 1989. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука. 288 с.
- Курашов Е.А. 2007. Мейобентос в пресноводных экосистемах. Его роль и перспективы исследования // Актуальные вопросы изучения микро-, мейозообентоса и фауны зарослей пресноводных водоёмов. Тем. лекции и мат. I Межд. школы-конф. Нижний Новгород: Вектор Ти С.С. 36–71.
- Кучко Я.А. 2004. Влияние форелевого хозяйства на сообщество зоопланктона озерно-речной системы. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск: ИБ КарелНЦ РАН. 26 с.
- Кучко Я.А., Савосин Е.С. 2020. Оценка состояния сообществ зоопланктона и макрозообентоса экосистемы Маслозера в зоне размещения форелевого хозяйства // Рыбоводство и рыбное хозяйство. № 5 (172). С. 10–20.
- Михайленко В.Г., Стерлигова О.П. 2021. Некоторые экологические аспекты садкового выращивания радужной форели // Труды КарелНЦ РАН № 12. С. 82–90. DOI: 10.17076/eco1509
- Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Т. 2. Зообентос. 2016. М.: Товарищество научных изданий КМК. 457 с.

- Охлопкова А.Н. 1966. Течения Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. С. 265–278.
- Романенко В.И. 1985. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоёмах. Л.: Наука. 295 с.
- Рыжков Л.П., Дзюбук И.М., Горохов А.В., Марченко Л.П., Артемьева Н.В., Иешко Т.А., Рябинкина М.Г., Раднаева В.А. 2011. Состояние водной среды и биоты при функционировании садковых форелевых хозяйств // Водные ресурсы. Т. 38. № 2. С. 244–252.
- Савосин Е.С. 2010. Макрозообентос и его динамика при выращивании товарной форели в Карелии. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск: ПетрГУ. 21 с.
- Сорокин Ю.И. 1974. Роль бактерий в жизни водоёмов. М.: Знание. 64 с.
- Стерлигова О.П., Кучко Я.А., Савосин Е.С., Ильмаст Н.В. 2019. Перспективы выращивания объектов аквакультуры в озёрах Карелии // Вопросы рыболовства. Т. 20. № 2. С. 216–224.
- Ускова И.В., Потешкина В.А., Калинин К.А. 2019. Комплексный мониторинг бактериопланктона рыбоводного хозяйства реки Тулома и энтеральной микробиоты кишечника, культивируемой в садках форели // Вестник МГТУ. Т. 22. № 3. С. 432–440. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-3-432-440
- Фомина Ю.Ю., Теканова Е.В., Калинин Н.М. 2019. Биоиндикация современного состояния Кондопожского залива Онежского озера в районе расположения форелевых хозяйств по показателям зоопланктона // Водные биоресурсы и среда обитания. Т. 2. № 2. С. 20–26. DOI: 10.47921/2619-1024_2019_2_2_20
- Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. 2005. Количественная гидроэкология. Методы, критерии, решения. В 2 кн. Кн.1. ИЭВБ РАН. М.: Наука. 281 с.
- Carr O.J., Goulder R. 1993. Directly counted bacteria in a trout farm and its effluent // Aquaculture and Fisheries Management. V. 24. P. 19–27.
- Farabi S.M.V., Golaghaei M., Sharifian M., Karimian E., Daryanabard G. 2022. Effects of rainbow trout farming on water quality around the sea farms in the south of the Caspian Sea // Caspian J. of Environmental Sciences. V. 20 (4). P. 729–737. DOI: 10.22124/CJES.2022.5725
- Kalantzi I., Karakassis I. 2006. Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data // Marine pollution bulletin. V. 52 (2). P. 484–493. DOI: doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.034
- Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K., Slukovskii Z. 2022. The seasonal dynamics of geochemical characteristics of sediments in the impact zone of the fish farm (Lake Ladoga, Russia) // Aquaculture and Fisheries V. 8. I. 6. P. 654–660 DOI: 10.1016/j.aaf.2022.09.003
- Porter K.G., Feig Y.S. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. // Limnology Oceanography. № 25. P. 943–948.
- Rooney R.C., Podemski C.L. 2009. Effects of an experimental rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farm on invertebrate community composition // Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences. V. 66(11). P. 1949–1964. DOI: 10.1139/F09-130
- Stone L., Weisburd R.S.J. 1992. Positive feedback in aquatic ecosystems // Trends in Ecology and Evolution. V. 7. № 8. P. 263–267.
- Villnäs A., Perus J., Bonsdorff E. 2011. Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment – Implications for community recovery potential // J. of Sea Research. V. 65, № 1. P. 8–18. DOI: 10.1016/j.seares.2010.06.004

REFERENCES

- Baturina M.A., Kononova O.N., Rafikov R.R. 2015. The state of aquatic invertebrate communities (plankton, benthos) under operating conditions in a trout pond // Population Ecology. No. 4. P. 84–89. (In Russ.).
- Belozeroва D.V., Kapustina L.L. 2020. Sanitary and microbiological characteristics of the habitat of aquatic biological resources in Lake Ladoga // Trudy VNIRO. V. 185. P. 94–104. DOI: 10.36038/2307-3497-2021-185-94-104. (In Russ.).
- Kapustina L.L., Mitrukova G.G. 2021. Bacterioplankton // The current state and problems of anthropogenic transformation of the ecosystem of Lake Ladoga in a changing climate / Kondratiev S.A., Pozdnyakov Sh. R., V.A. Rumyantsev eds. Moscow: RAS Publish. P. 323–336. (In Russ.).
- Kireeva I. Yu. 2014. General characteristics of bacterioplankton in the feeding pond of the DVSRP «Limansky fish farm» // Volga Scientific Bulletin. No. 10 (38). P. 9–11. (In Russ.).
- Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. 1989. Methods for the study of aquatic microorganisms. Moscow: Nauka. 288 p. (In Russ.).
- Kurashov E.A. 2007. Meiobenthos in freshwater ecosystems. Its role and prospects for research // Topical issues in the study of micro-, meiozoobenthos and fauna of freshwater thickets. Thematic lectures and materials of the I International School-Conference. Nizhny Novgorod: Vector Ti S. pp. 36–71. (In Russ.).
- Kuchko Ya. A. 2004. The influence of trout farming on the zooplankton community of the lake-river system. PhD Abstr. in biology. Petrozavodsk: IB KarelRC RAS. 26 p. (In Russ.).
- Kuchko Ya. A., Savosin E.S. 2020. Assessment of the state of zooplankton and macrozoobenthos communities of the Masllake ecosystem in the area of trout farming // Fish farming and fisheries. No. 5 (172). P. 10–20. (In Russ.).
- Mikhaylenko V.G., Sterligova O.P. 2021. Some ecological aspects of rainbow trout cage rearing // Proceedings of the KarelSC RAS. No. 12. P. 82–90. (In Russ.).
- Qualifier to zooplankton and zoobenthos in fresh waters of European Russia. Vol. 2. Zoobenthos. 2016. Moscow: Association of scientific publications KMK. 457 p. (In Russ.).
- Okhlopova A.N. 1966. Currents of Lake Ladoga // Hydrological regime and water balance of Lake Ladoga. Leningrad: Leningrad SU Publish. P. 265–278 (In Russ.).
- Romanenko V.I. 1985. Microbiological processes of production and destruction of organic matter in inland waters. Leningrad: Nauka. 295 p. (In Russ.).
- Ryzhkov L. P., Dzyubuk I. M., Gorokhov A. V., Marchenko L. P., Artemyeva N. V., Ieshko T. A., Ryabinkina M. G., Radnaeva V. A. 2011. The state of the aquatic environment and biota in

- the functioning of cage trout farms // Water resources. V. 38. No. 2. P. 244–252. (In Russ.).
- Savosin E.S.* 2010. Macrozoobenthos and its dynamics in the cultivation of commercial trout in Karelia. PhD Abstr. in biology. Petrozavodsk: PetrGU. 21 p. (In Russ.).
- Sorokin Yu.I.* 1974. The role of bacteria in the life of reservoirs. Moscow: Znanie. 64 p. (In Russ.).
- Sterligova O.P., Kuchko Ya.A., Savosin E.S., Ilmast N.V.* 2019. Prospects of cultivation of aquaculture objects in the lakes of Karelia // Problems of fishiries. V. 20. No. 2. P. 216–224 (In Russ.).
- Uskova I.V., Poteshkina V.A., Kalinchuk K.A.* 2019. Comprehensive monitoring of bacterioplankton of fish farming of the Tuloma River and enteral intestinal microbiota cultivated in trout cages // Bulletin of the MSTU. V. 22. No. 3. P. 432–440. DOI: 10.21443/1560–9278–2019–22–3–432–440. (In Russ.).
- Fomina Yu. Yu., Tekanova E.V., Kalinkina N.M.* Bioindication of the current state of the Kondopoga bay of lake Onego in the areas, affected by trout farms, through the use of zooplankton parameters // Water bioresources and habitat. Vol. 2. No. 2. P. 20–26. DOI: 10.47921/2619–1024_2019_2_2_20. (In Russ.).
- Carr O.J., Goulder R.* 1993. Directly counted bacteria in a trout farm and its effluent // Aquaculture and Fisheries Management. V. 24. P. 19–27.
- Farabi S.M.V., Golaghaei M., Sharifian M., Karimian E., Daryanabard G.* 2022. Effects of rainbow trout farming on water quality around the sea farms in the south of the Caspian Sea // Caspian J. of Environmental Sciences. V. 20 (4). P. 729–737. DOI: 10.22124/CJES.2022.5725
- Kalantzi I., Karakassis I.* 2006. Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data // Marine pollution bulletin. V. 52 (2). P. 484–493. DOI: doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.034
- Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K. Slukovskii Z.* 2022. The seasonal dynamics of geochemical characteristics of sediments in the impact zone of the fish farm (Lake Ladoga, Russia) // Aquaculture and Fisheries V. 8. I. 6. P. 654–660 DOI: 10.1016/j.aaf.2022.09.003
- Porter K.G., Feig Y.S.* 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. // Limnology Oceanography. № 25. P. 943–948.
- Rooney R.C., Podemski C.L.* 2009. Effects of an experimental rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farm on invertebrate community composition // Canadian J. of Fisheries and Aquatic Sciences. V. 66(11). P. 1949–1964. DOI: 10.1139/F09–130
- Stone L., Weisburd R.S.J.* 1992. Positive feedback in aquatic ecosystems // Trends in Ecology and Evolution. V. 7. № 8. P. 263–267.
- Villnäs A., Perus J., Bonsdorff E.* 2011. Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment – Implications for community recovery potential // J. of Sea Research. V. 65, № 1. P. 8–18. DOI: 10.1016/j.seares.2010.06.004

Поступила в редакцию 24.04.2023 г.
Принята после рецензии 13.11.2023 г.