

Научная статья

УДК 639.3.06

<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2026-2-58-69>

EDN LCZADH

Особенности гидробиоценоза биофильтра рыбоводной установки замкнутого цикла

Мадина Фархадовна Хамитова[✉], Марина Львовна Калайда

Казанский государственный энергетический университет,
Казань, Россия, it-sk@bk.ru[✉]

Аннотация. Рассмотрены особенности качественного и количественного состава гидробиоценоза биофильтра рыбоводной установки с замкнутым циклом водообеспечения. Изучены особенности пространственного распределения разных видов, входящих в состав перифитона: распределение по глубине биофильтра, по направлениям «к поверхности» и «к дну». Показано значительное таксономическое разнообразие групп и видов в составе перифитона биофильтра рыбоводной установки. Выявлено 38 видов, относящихся к 9 таксономическим группам. Наиболее представленной группой были инфузории, включающие 52,6 % от общего разнообразия. Показано, что на разных глубинах (у поверхности, в среднем слое и у дна биофильтра) формируются разные сообщества видов перифитона: индекс Жаккара составил для сообществ с глубины 10 и 40 см – 0,59, для сообществ с глубины 10 и 80 см – 0,57, для сообществ с глубины 40 и 80 см – 0,67. Направление поверхности субстрата также оказалось значимым фактором: сообщества на пластинах, направленных «вверх» и «вниз», значительно различались по видовому составу. На верхних пластинах доминировали подвижные инфузории (род *Euplotes*) и амёбы. На нижних поверхностях преобладали сидячие инфузории (*Vorticella*), коловратки и олигохеты. Общая численность перифитона варьировала от 29 443 тыс. экз./м² в среднем слое биофильтра до 31 336 тыс. экз./м² у поверхности и до 31 630 тыс. экз./м² на глубине биофильтра 80 см. Наибольший вклад в общую численность вносили коловратки и инфузории. У ряда видов отмечалось увеличение численности в биофильтре с увеличением глубины, у других – обратная тенденция. В отличие от гидробиоценоза биофильтра для очистки сточных коммунально-бытовых вод, в гидробиоценозе биофильтра рыбоводной установки с круглогодичным циклом использования максимально были представлены β-мезосапробы.

Ключевые слова: аквакультура, установка замкнутого цикла, биофильтр, гидробиоценоз, перифитон, видо-вая структура, численность

Для цитирования: Хамитова М. Ф., Калайда М. Л. Особенности гидробиоценоза биофильтра рыбоводной установки замкнутого цикла // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2026. № 2. С. 58–69. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2026-2-58-69>. EDN LCZADH.

Original article

Features of the hydrobiocenosis of the biofilter of a recirculating aquaculture system

Madina F. Khamitova[✉], Marina L. Kalaida

Kazan State Power Engineering University,
Kazan, Russia, it-sk@bk.ru[✉]

Abstract. The qualitative and quantitative composition of the hydrobiocenosis in a recirculating aquaculture system's biofilter is examined. The spatial distribution of various periphyton species is studied, including their distribution across the biofilter's depth and in the surface and bottom directions. Significant taxonomic diversity of groups and species within the periphyton of a fish-breeding facility's biofilter was demonstrated. Thirty-eight species belonging to nine taxonomic groups were identified. Ciliates were the most widely represented group, comprising 52.6% of the total diversity. It was shown that different communities of periphyton species are formed at different depths (at the surface, in the middle layer and at the bottom of the biofilter): the Jaccard index was 0.59 for communities at a depth of 10 and 40 cm, 0.57 for communities at a depth of 10 and 80 cm, and 0.67 for communities at a depth of 40 and 80 cm. The substrate surface orientation also proved to be a significant factor: communities on the “upward” and “downward” facing plates differed significantly in species composition. On the upper surfaces, motile ciliates (genus *Euplotes*) and

amoebae dominated. Sessile ciliates (*Vorticella*), rotifers, and oligochaetes predominated on the lower surfaces. The total number of periphyton varied from 29 443 thousand specimens/m² in the middle layer of the biofilter to 31 336 thousand specimens/m² at the surface and up to 31 630 thousand specimens/m² at a biofilter depth of 80 cm. Rotifers and ciliates contributed the most to the overall abundance. Some species showed an increase in abundance in the biofilter with increasing depth, while others showed the opposite trend. Unlike the hydrobiocenosis of the biofilter for municipal wastewater treatment, the hydrobiocenosis of the biofilter of the year-round fish farm had the highest abundance of β -mesosaprobies.

Keywords: aquaculture, recirculating aquaculture system, biofilter, hydrobiocenosis, periphyton, species structure, abundance

For citation: Khamitova M. F., Kalaida M. L. Features of the hydrobiocenosis of the biofilter of a recirculating aquaculture system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing industry. 2026;2:58-69.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2026-2-58-69>. EDN LCZADH.

Введение

С начала 2000-х гг. в связи с увеличением количества сторонников здорового образа жизни отмечается подтвержденный рыночный спрос на продукцию из водных биоресурсов. По прогнозным оценкам к 2050 г. население Земли достигнет 9,7 млрд человек [1, 2]. Это отразится на спросе и предложении пищевой продукции из водных животных. Чтобы сохранить потребление продукции из водных биоресурсов на уровне около 21 кг на душу населения до 2050 г., совокупное предложение должно повыситься на 36 млн т в эквиваленте живого веса, т. е. на 22 %. К 2030 г. потребление рыбы на душу населения прогнозируется на уровне 21,5 кг, что на 18 % выше показателей 2010 г. [3, 4].

По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), доля аквакультуры в общем объеме производства водных биоресурсов превысила 52 % [5–7]. По оценкам ФАО производство продукции аквакультуры в период 2022–2032 гг. будет стабильно расти в среднем на 1,6 % в год. Это более чем в половину медленнее, чем в 2012–2022 гг., когда этот показатель составлял 4,0 %. Снижение темпов роста связывается со следующими факторами:

- широкое принятие и обеспечение соблюдения природоохранных норм;
- сокращение доступности воды (как по количеству, так и по качеству);
- сокращение числа участков, пригодных для аквакультуры;
- усиление воздействия болезней водных животных в интенсивных системах аквакультуры;
- замедление роста продуктивности.

В связи с глобальными задачами ФАО в 2022 г. разработала Дорожную карту инициативы «Голубая трансформация» [3], стремясь обеспечить расширение и интенсификацию аквакультуры. Происходит постепенное замещение добываемой рыбной продукции из природных водных экосистем на производимую в аквакультурных хозяйствах. Таким образом, ставятся задачи выращивания рыбной продукции в контролируемых искусственных экосистемах с применением промышленных методов. Такой подход к воспроизводству и товарному выращиванию водных биоресурсов позволяет существенно увеличить интенсивность производства рыбной

продукции с единицы площади водоемов и перейти к высокопродуктивному производству. Одновременно сокращается нагрузка на природные водные экосистемы, улучшается экологическое состояние водных ресурсов регионов. В таких условиях ключевую роль играют технологии, позволяющие повысить эффективность и устойчивость производства объектов аквакультуры.

В настоящее время наиболее перспективным направлением развития аквабиотехнологий признаны установки с замкнутым циклом водоснабжения (УЗВ), обеспечивающие контроль параметров среды и минимизацию экологических рисков [8, 9]. Например, в Норвегии и Дании внедрение УЗВ позволило увеличить продуктивность лососевых ферм на 30–40 %, сократив при этом расход воды на 90 % по сравнению с традиционными методами [10]. Однако стабильность таких систем напрямую зависит от работы биофильтров, где биоценоз микроорганизмов и перифитона выполняет основную функцию – нитрификацию токсичных метаболитов (аммиака, нитритов) и поддержание качества воды. Исследования показывают, что до 70 % успеха установок замкнутого водоснабжения (УЗВ) связано с эффективностью биофильтрации: отсутствие стабильности в биоценозе приводит к накоплению азотистых соединений, что снижает выживаемость молоди рыб на 25–50 % [11, 12].

На современном этапе аквакультура Республики Татарстан, фермерское рыбководство в основном ориентированы на использование прудов и малых водоемов комплексного назначения, где основными выращиваемыми объектами являются карп и растительноядные рыбы. Из 20 наиболее крупных рыбохозяйственных предприятий в Республике Татарстан только 3 используют промышленные методы рыбководства на базе установок замкнутого цикла. При этом их доля в общем объеме выручки предприятий группы ТОП-20 превышает 38 %. Поскольку актуальность развития рыбохозяйственного кластера обусловлена и задачами продовольственной безопасности, в которых в качестве критерия определен удельный вес российской рыбной продукции не менее 80 %, существенное увеличение производства рыбы в регионе связано с развитием промышленных форм рыбководства, в том числе с малыми УЗВ в фермерских хозяйствах.

Для успешного выращивания рыбы в УЗВ важен экосистемный подход, который определяет качество воды, эффективность ее очистки биофильтром, рыбоводно-биологические характеристики рыб в системе (набор видов, плотности посадки, скорости массонакопления, время выращивания до заданной массы, до полового созревания). Детальный сбор информации по функционированию УЗВ позволит эффективнее управлять рыбоводно-технологическим процессом.

Если рыбоводным результатам и изменению химических характеристик воды посвящено значительное количество научных работ, то консументы гидробиоценоза биофильтра малой УЗВ и их роль в функционировании установки мало изучены. В связи с этим *целью исследования* явилось изучение состава гидробиоценоза биологического фильтра рыбоводной установки. Задачами данного исследования были определение качественного и количественного состава биоценоза биофильтра малой УЗВ; изучение его изменения на разной глубине биофильтра и на поверхностях, по-разному ориентированных – «вверх» и «вниз»; сравнение данных по характеристике гидробиоценоза биофильтров систем очистки воды, которые эксплуатируются сезонно (летом) на открытом воздухе [13], с данными по характеристике гидробиоценоза биофильтра малой УЗВ объемом 1 м³ с водоснабжением из водопроводной системы, находящейся в помещении и работающей в круглогодичном режиме.

Основные исследования гидрофауны очистных сооружений проводились в аэротенках [13]. В атласе «Фауна аэротенков» [13] дано описание 440 видов основных групп животных, встречающихся в среде активного ила. Особенностью деятельности гидрофауны аэротенков является близость процессов к естественному самоочищению вод, подобному на полях фильтрации и в биологических прудах. В конце XX в. наиболее интенсивно использовались именно аэротенки, их использовали для очистки больших объемов (более 30 тыс. м³/сут) сточных вод. Биофильтры, заполненные крупнозернистым фильтрующим материалом (гранитный щебень, керамзит, гранулированная пластмасса), использовались для очистки сточных вод менее эффективно, чем аэротенки. В биофильтрах на поверхности загрузочного материала образовывалась биологическая пленка, состоящая из аэробных бактерий, различных видов беспозвоночных и водорослей, участвующих в окислении органических загрязняющих веществ. Проведенные исследования позволили сделать вывод о схожести не только принципов работы биофильтров и полей орошения, но и видового состава биоценозов [13, 14].

По результатам исследований биофильтров систем очистки воды было установлено, что в верхних слоях биофильтра преобладали полисапробные организмы, которые были представлены малым видовым

разнообразием, а численность этих видов была большой. С увеличением глубины биофильтра возрастало видовое разнообразие с сокращением количественной представленности каждого вида [13]. На последних стадиях очистки отмечался наиболее разнообразный видовой состав с наименьшей численностью гидробионтов. По данным Л. А. Кутиковой [13], основным отличием биофильтра от аэротенка было наличие градации сапробных организмов по ходу очистки, в то время как в аэротенках наблюдалось смешение организмов разных зон сапробности в связи с турбулентностью и рециркуляцией ила. Еще одним своеобразием видового состава биоценоза биопленки было присутствие в ее верхнем слое водорослей и насекомых (ногохвостки и мешочницы). Отмечалось, что развитие водорослей связано с наличием освещенности поверхностного слоя, а насекомые – с отсутствием турбулентности. Отмечались главное достоинство биофильтров по сравнению с биологическими прудами – быстрота очистки – и главный недостаток – биофильтры не работали в зимний период в зонах с холодным климатом [13]: процесс очистки при температуре ниже 6 °С прекращался.

В настоящее время биофильтры используются в промышленном рыбоводстве на базе УЗВ в помещениях с контролируемыми температурами. Биофильтры в системе УЗВ, в отличие от биофильтров очистки коммунальных стоков, имеют узкую направленность: осуществляют нитрификацию азотной группы. Очистка воды от азота в биофильтрах УЗВ производится в 2 стадии. Каждую из стадий осуществляет своя группа бактерий:

1. Окисление общего аммонийного азота (NH₃⁺, NH₄) в нитриты (NO₂) осуществляется бактериями группы Nitrosomonas.

2. Окисление нитритов (NO₂) в нитраты (NO₃) осуществляется бактериями группы Nitrobacter.

Основная цель нитрификации – окислить токсичный аммиак NH₃ в условно нетоксичные нитраты NO₃.

Денитрификация – процесс, позволяющий окислить нитриты и перевести их в газообразный азот, сбросив в атмосферу.

Бактериям для осуществления процессов нитрификации в обязательном порядке необходим кислород. Окислительная мощность биофильтра максимальна при содержании растворенного кислорода в воде не менее 80 %. При отсутствии или низком содержании кислорода в воде биопленка начинает отмирать. Именно поэтому биофильтр зачастую принудительно аэрируют атмосферным воздухом [13].

Использование биофильтров в рыбоводных установках стало возможным и в связи с развитием биоагрузки – субстрата для закрепления бактерий – пластиковых структур с высокой площадью поверхности с максимально разветвленной структурой, например загрузка типа «кипящий слой» (рис. 1, б).

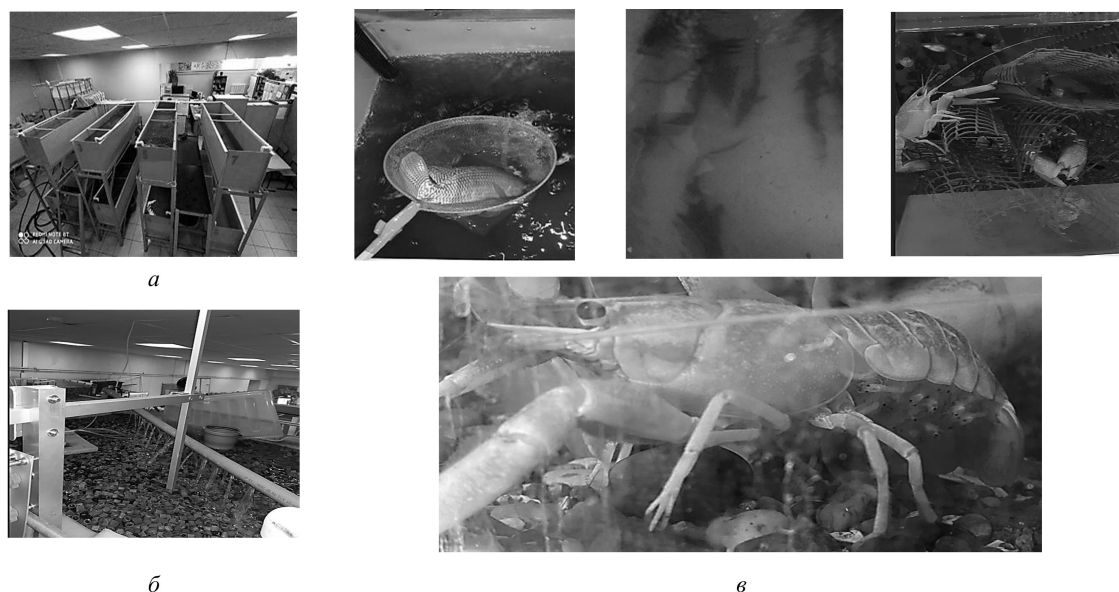


Рис. 1. Общий вид бассейнов (а), загрузки типа «кипящий слой» в биофилт্রে УЗВ (б) и объектов выращивания (в)

Fig. 1. General view of pools (a), “moving layer” loading in the RAS biofilter (b) and cultivation facilities (c)

В настоящее время в связи с увеличением производства рыбы в промышленных условиях изучение структуры и динамики гидробиоценозов биофилтров приобретает особую актуальность в контексте оптимизации УЗВ. Перифитон, представляющий собой сообщество бактерий, водорослей и простейших, консументов разного порядка, формирующихся на поверхности загрузки биофилтра, выступает основным участником процесса биологической очистки. Его видовой состав и активность напрямую связаны со скоростью преобразования аммиака в нитраты – процесса, от которого зависит жизнеспособность всей системы и, в первую очередь, самочувствие рыб.

Целью исследования является изучение структуры гидробиоценоза на разных глубинах биофилтра рыбоводной установки замкнутого цикла.

Материал и методы исследований

Исследование перифитона проводилось методом микропипирования в живом состоянии в соответствии с общепринятой методикой Л. А. Кутиковой [13, 15]. После основного подсчета организмов

дополнительно просматривали пробу как при большом, так и при меньшем увеличении, чтобы не пропустить очень редкие или очень мелкие организмы. Эксперимент проводился в действующей УЗВ, включающей 8 рыбоводных бассейнов (см. рис. 1, а) по 0,4 м³ воды, в которых содержались 5 видов рыб (см. рис. 1, в): карп-кои (*Cyprinus carpio koi*), кометы (*Carassius auratus*), 2-летки гибридов ленкорусского осетра (*Acipenser queldenstqdtii* × *Acipenser baerii*), известного как осетр Роло, стерлядь (*Acipenser ruthenus*), нильская тилапия (*Oreochromis niloticus*) и австралийские красноклешневые раки (*Cherax quadricarinatus*). Тип биофилтра – с плавающей загрузкой, объемом 1 000 л. Разнообразие объектов выращивания определяется использованием установки в образовательных целях.

Для исследования гидробиоценоза биофилтра использовалось устройство для отбора гидробиологических проб перифитона в условиях работающих биофилтров рыбоводных УЗВ [16], позволяющее фиксировать пластины на разных глубинах – 10, 40 и 80 см (рис. 2).

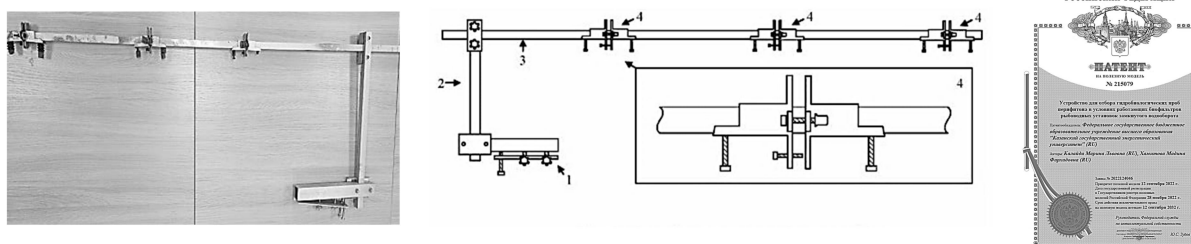


Рис. 2. Конструкция для отбора проб перифитона из работающих биофилтров УЗВ

Fig. 2. A design for sampling periphyton from working RAS biofilters

В качестве пластин использовались предметные стекла из оргстекла с размеченными квадратами разной площадью для подсчета разных размерных групп гидробионтов. Время экспозиции стекол составляло по 15 суток в марте и апреле 2024 г.

На каждом уровне были закреплены по 2 экспериментальных стекла: первого с поверхностью,

направленной вверх, второго – направленной вниз. Проводилось определение видов, измерение размеров особей с помощью окуляр-микрометра и количественный учет на фиксированной площади. Документирование результатов включало создание фото- и видеоархива всех наблюдаемых видов и форм гидробионтов (рис. 3).

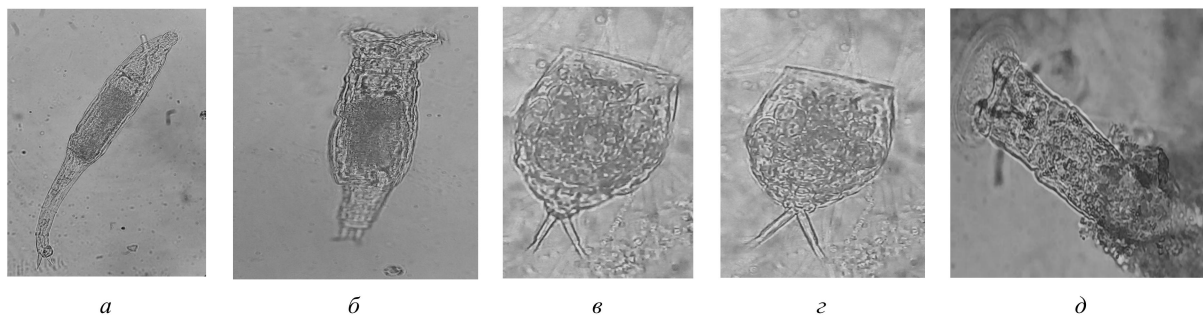


Рис. 3. Коловратки в пробах перифитона биофильтра УЗВ: а, б – *Rotaria elongata* (Weber, 1888); в, г – *Lecane luna* (Muller, 1776); д – *Conochiloides natans* (Seligo, 1900)

Fig. 3. Rotifers in periphyton samples of the RAS biofilter: а, б – *Rotaria elongata* (Weber, 1888); в, г – *Lecane luna* (Muller, 1776); д – *Conochiloides natans* (Seligo, 1900)

Для оценки степени сходства между сообществами использовался индекс Жаккара

$$J = c / (a + b - c),$$

где J – индекс Жаккара; a и b – количество видов в одной и другой выборке соответственно; c – количество видов, общих для двух выборок [17].

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенного исследования выявлено значительное таксономическое разнообразие гидробионтов, обитающих в биофильтре работающей УЗВ: 38 видов и форм организмов, относящихся к систематическим группам (рис. 4): растительные жгутиконосцы – 1; настоящие амёбы – 4; инфузории – 20; мшанки – 1; гастротрихи – 1; турбеллярии – 1; нематоды – 1; колдовратки – 4; олигохеты – 5.

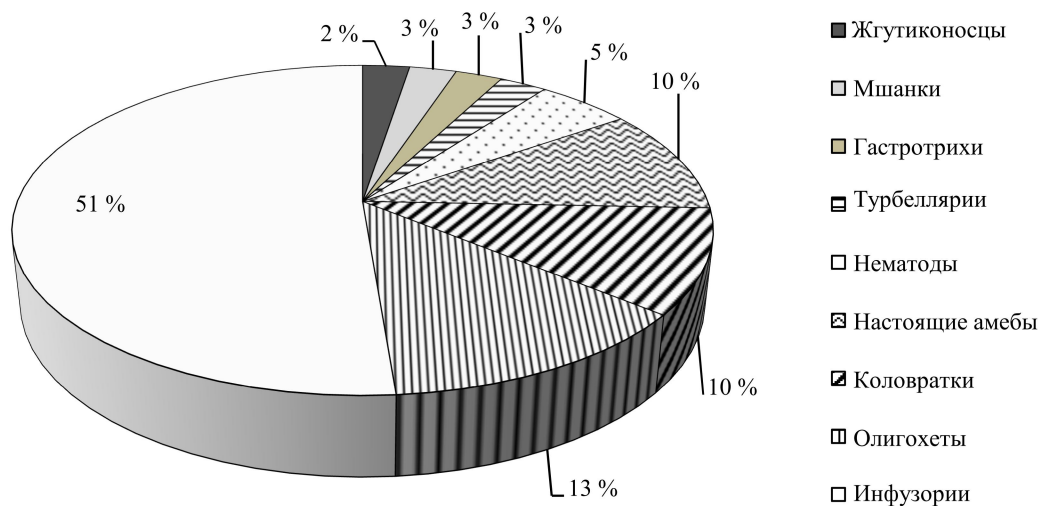


Рис. 4. Состав (% от общего количества видов и форм) гидробиоценоза биологического фильтра УЗВ кафедры «Водные биоресурсы и аквакультура» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Fig. 4. Composition (% of the total number of species and forms) of the hydrobiocenosis of the biological filter of the RAS of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture of the FSBEI of HE "KSPEU"

Наиболее представленной группой были инфузории, включающие 20 видов (51 % от общего разнообразия) (см. рис. 4), доминантами были *Aspidisca costata*, *Euplotes patella* (активный хищник, регулирующий численность мелких простейших), *Tetrahymena pyriformis*, *Trochilia* sp. (эффективные бактериофаги, контролирующие развитие бактериальных пленок); *Vorticella microstoma* (сидячая фильтрующая форма) [18].

Необходимо отметить, что исследуемый перифитон экспериментальных пластин сформировался за 15 суток.

Для биофильтров, работающих со сточными водами, было характерно увеличение видового разнообразия [13, 19] с увеличением глубины биофильтра. На рис. 5 представлены изменения состава изученного гидробиоценоза биофильтра УЗВ с увеличением его глубины.

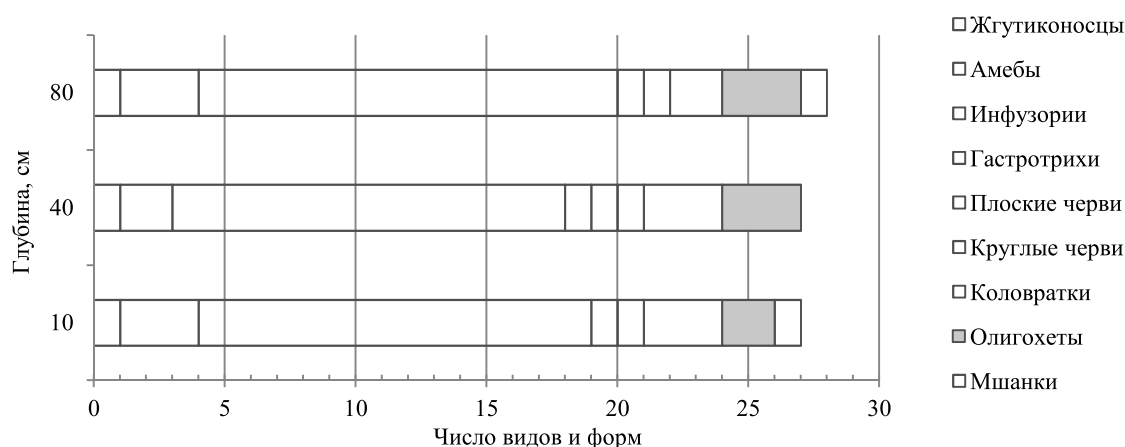


Рис. 5. Видовой состав гидробиоценоза биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 5. Species composition of the hydrobiocenosis of the RAS biofilter depending on the depth

Как видно из представленных на рис. 5 данных, в биофильтре УЗВ также отмечается незначительное увеличение видового разнообразия. В связи с этим была проведена оценка степени сходства между сообществами гидробионтов на разных глубинах биофильтра. Индекс Жаккара составил для сообществ с глубины 10 и 40 см – 0,59, для сообществ с глубины 10 и 80 см – 0,57, для сообществ с глубины 40 и 80 см – 0,67.

Направление поверхности субстрата также оказалось значимым фактором: сообщества на пластинах, направленных «вверх» и «вниз», значительно различались по видовому составу. На верхних пла-

стинах доминировали подвижные инфузории (род *Euplotes*) и амебы. На нижних поверхностях преобладали сидячие инфузории (*Vorticella*), коловратки и олигохеты.

Трофическая структура сообщества гидробионтов биофильтра включала 4 функциональные группы (рис. 6):

- бактериофаги (*Tetrahymena pyriformis*, *Trochilia*);
- детритофаги (*Lecane luna*, *Planaria aequisetata*);
- хищники (*Euplotes patella*, *Planaria*);
- фильтраторы (*Vorticella microstoma*, *Rotaria elongata*).

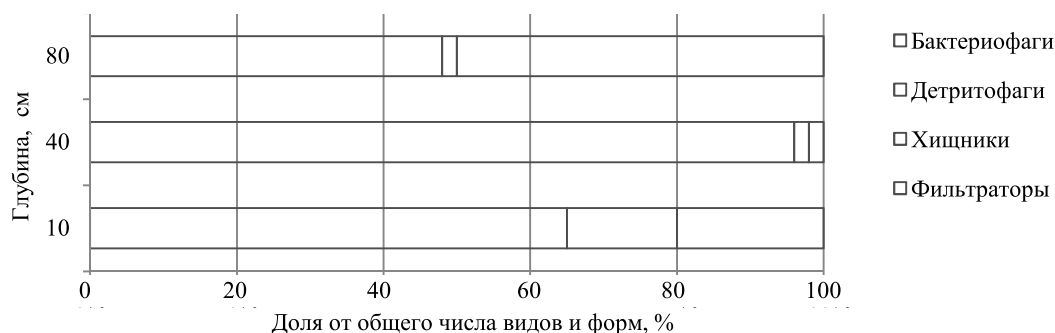


Рис. 6. Трофическая структура гидробиоценоза биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 6. Trophic structure of hydrobiocenosis of RAS biofilter depending on depth

Как видно из приведенных на рис. 6 данных, бактериофаги преобладали в верхних участках био-

фильтра, а детритофаги – в нижних. Данная пространственная и трофическая организация гидро-

биоценоза биофильтра промышленной рыбной установки на практике обеспечивала эффективную поэтапную переработку органических веществ.

Поскольку было отмечено [13], что с увеличением глубины в биофильтрах очистных сооружений при увеличении видового разнообразия наблюдалось сокращение количественной представленности каждого вида, то особый интерес представляют данные по фактической количественной представ-

ленности гидробионтов в биофильтре рыбной установки.

Общая численность перифитона варьировала от 29 443 тыс. экз./м² в среднем слое биофильтра до 31 336 тыс. экз./м² у поверхности и до 31 630 тыс. экз./м² на глубине биофильтра 80 см. Вклад в общую численность разных групп гидробионтов представлен на рис. 7.

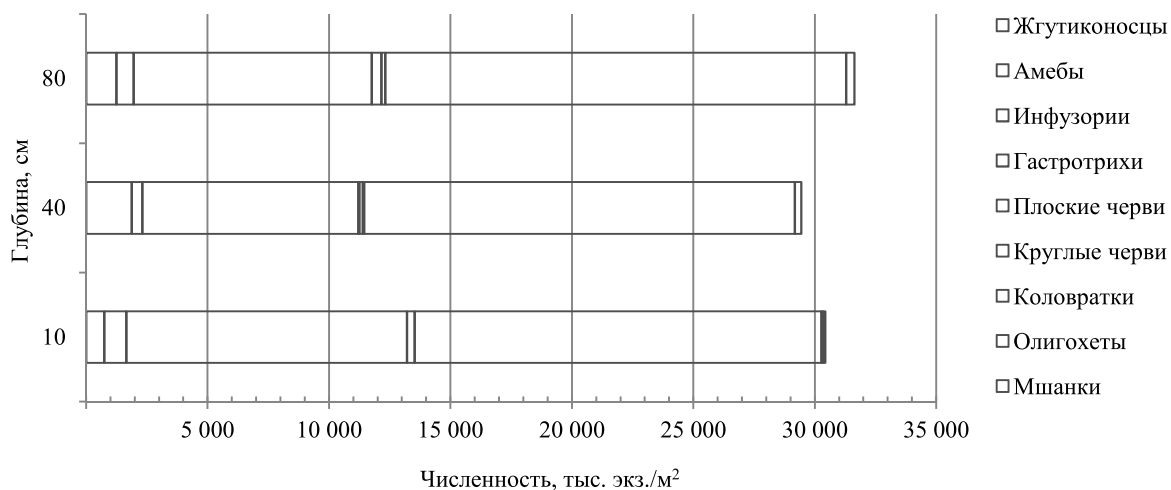


Рис. 7. Численность групп гидробионтов в перифитоне биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 7. The number of hydrobionts groups in the periphyton of the RAS biofilter depending on the depth

Наибольший вклад в общую численность на всех глубинах биофильтра вносили коловратки и инфузории (см. рис. 7).

У ряда видов, например инфузорий, отмечается увеличение численности в биофильтре с увеличением глубины (рис. 8).

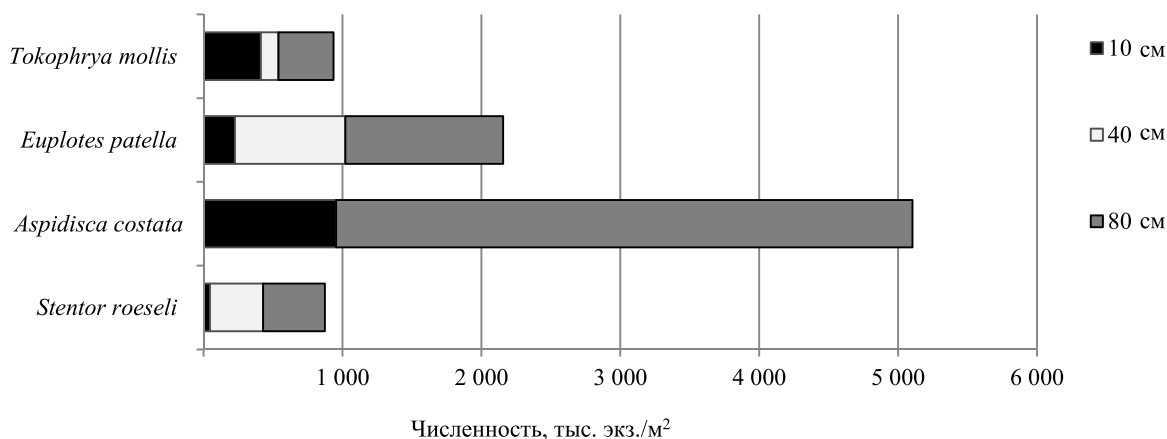


Рис. 8. Численность доминирующих видов инфузорий класса *Polyhymenophora* в перифитоне биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 8. The number of dominant species of ciliates of the class *Polyhymenophora* in the periphyton of the RAS biofilter depending on the depth

В то же время есть виды, у которых наблюдается обратная картина распределения по глубине: с уве-

личением глубины численность снижается (рис. 9).

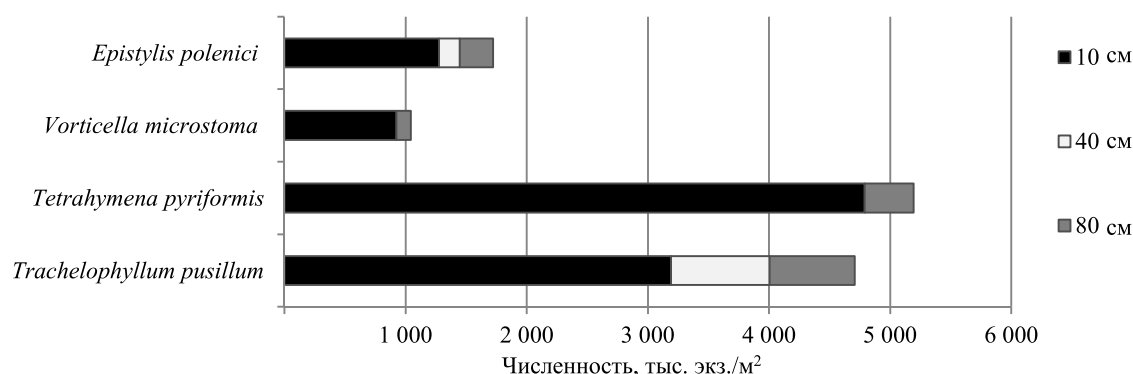


Рис. 9. Численность доминирующих видов инфузорий классов *Kinetofragminophora* и *Peritricha* в перифитоне биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 9. The number of dominant species of ciliates of the classes *Kinetofragminophora* and *Peritricha* in the periphyton of the RAS biofilter depending on the depth

Следует отметить, что доминирующий вид среди коловраток – *Rotaria elongata* – с максимальной численностью 18 929,76 тыс. экз./м² отмечался в более глубоких слоях биофильтра (рис. 10).

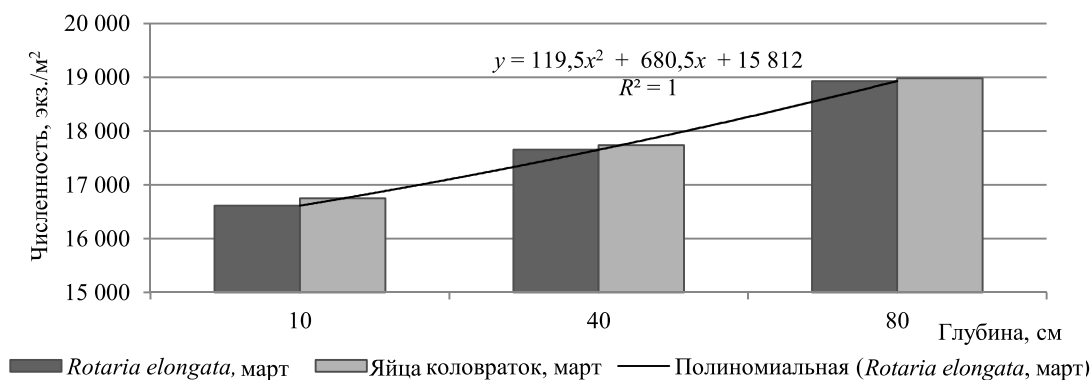


Рис. 10. Численность доминирующего вида коловраток *Rotaria elongata* в перифитоне биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 10. The abundance of the dominant rotifer species *Rotaria elongata* in the periphyton of the RAS biofilter depending on the depth

Необходимо отметить, что в составе гидробиоценоза встречались коловратки, которые отмечались только в поверхностном слое (рис. 11), а другие – на большей глубине.

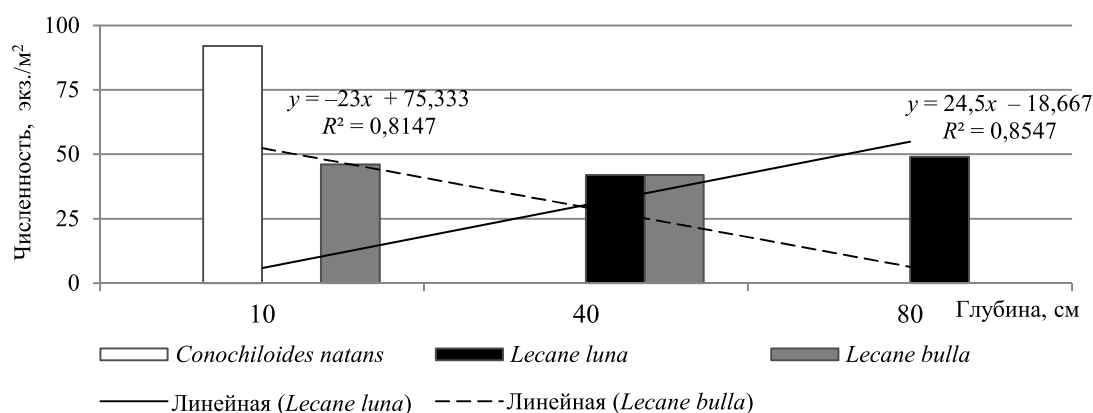


Рис. 11. Численность ряда видов коловраток в перифитоне биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 11. The number of some species of rotifers in the periphyton of the RAS biofilter depending on the depth

Аналогичная картина наблюдалась и у олигохет в составе перифитона биофильтра УЗВ, так, для *Dero dorsalis* и *Aelosoma variegatum* наблюдалось увеличение численности с увеличением глубины.

Олигохеты *Aelosoma hemprichi* встречались только на глубине 40 см и преобладали в этой зоне по численности над другими представителями данной группы (рис. 12).

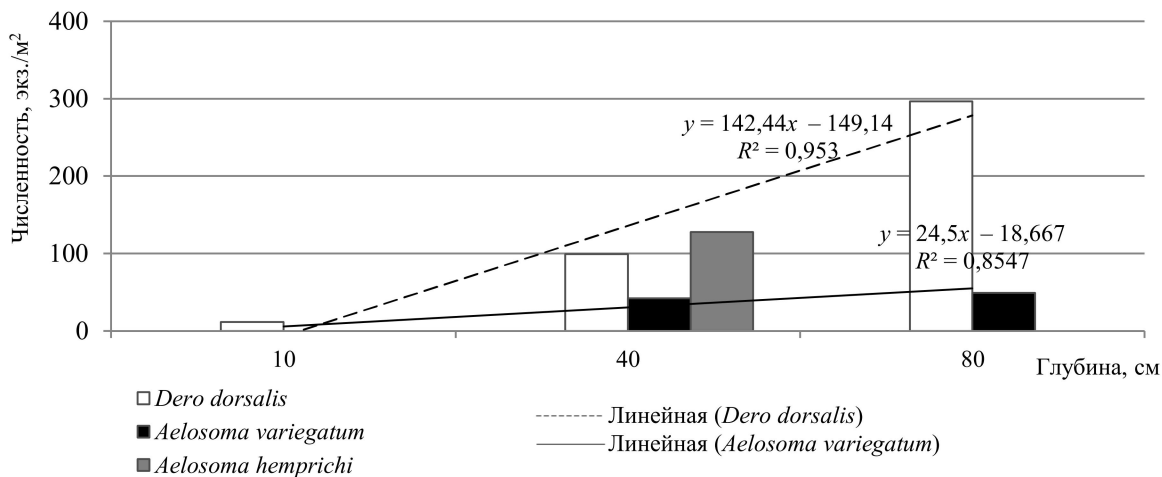


Рис. 12. Численность ряда видов олигохет в перифитоне биофильтра УЗВ в зависимости от глубины

Fig. 12. The abundance of a number of oligochaete species in the periphyton of a RAS biofilter depending on the depth

В ранее проведенных исследованиях [13] отмечалось, что для биофильтров, эксплуатируемых для очистки коммунально-бытовых сточных вод, было характерно преобладание в верхних слоях биофильтра полисапробных организмов, которые были представлены малым видовым разнообразием, а числен-

ность их была большой. Для сравнения на рис. 13 приведено соотношение видов, у которых была отмечена тенденция с максимальной численностью находиться в поверхностном слое, к видам, которые с максимальной численностью отмечались в более глубоких слоях биофильтра (у дна).



Рис. 13. Соотношение видов с максимальной численностью в поверхностном слое и видов с максимальной численностью в более глубоких слоях биофильтра

Fig. 13. Ratio of species with maximum abundance in the surface layer to species with maximum abundance in the deeper layers of the biofilter

Оценивая виды перифитона, имевшие максимальную численность у поверхности, необходимо отметить, что 53,8 % видов отсутствовали в таблицах сапробности по [13], и один из них – *Lecane bul-*

la – в таблицах сапробности Сладечека [20] относится к олигосапробным формам. *Epistylis polenici* отсутствует в таблицах сапробности по [13] и Сладечека [20], но имеются данные по сапробности других

видов рода *Epistylis*. Они относятся к β - и α -мезосапробам. Настоящие полисапробы среди этих видов отсутствовали. К возможным полисапробам могут быть отнесены 7,69 % видов, характеризующихся широкой степенью экологической валентности – альфа-мезосапробные – полисапробные виды ($\alpha - p$). Остальные виды относились к бета-мезосапробным формам (β). В целом виды перифитона, имевшие максимальную численность у поверхности биофильтра, относились к β -мезосапробам. Таким образом, степень сапробности у видов инфузорий *Tokophrya mollis*, *Tetrahymena pyriformis*, *Epistylis polenici* и коловраток *Gastotricha* sp., *Conochiloides natans* может быть оценена как β -мезосапробность.

Заключение

Развитие индустриальных форм аквакультуры связано с проблемами выведения метаболитов рыб из рыбоводной системы. В установках замкнутого цикла, которые позволяют выращивать рыбу круглогодично, очистка воды происходит в биологических фильтрах. Формируемая искусственная экологическая система на базе УЗВ, как показывают исследования, является более сложной, чем набор выращиваемых объектов и бактериопланктона биофильтра, и может рассматриваться как природоподобная. Данное исследование позволяет лучше представить особенности формирования гидробиоценоза биофильтра в условиях замкнутых систем по сравнению с биофильтрами систем очистки воды на открытом воздухе и наметить пути дальнейших исследований. Исследование гидробиоценоза биологического фильтра выявило значительное таксономическое разнообразие гидробионтов: 38 видов и форм организмов, относящихся к систематическим группам: растительные жгутиконосцы – 1; настоящие амёбы – 4; инфузории – 20; мшанки – 1; гастротрихи – 1; турбеллярии – 1; нематоды – 1; коловратки – 4; олигохеты – 5.

На разных глубинах биофильтра складывались различные сообщества организмов. Индекс Жаккара составил для сообществ с глубины 10 и 40 см – 0,59,

для сообществ с глубины 10 и 80 см – 0,57, для сообществ с глубины 40 и 80 см – 0,67. Направление поверхности субстрата также оказалось значимым фактором: сообщества на пластинах, направленных «вверх» и «вниз», значительно различались по видовому составу. На верхних пластинах доминировали подвижные инфузории (род *Euplotes*) и амёбы. На нижних поверхностях преобладали сидячие инфузории (*Vorticella*), коловратки и олигохеты.

Трофическая структура сообщества гидробионтов биофильтра рыбоводной установки включала четыре функциональные группы:

- бактериофаги (*Tetrahymena pyriformis*, *Trochilia*);
- детритофаги (*Lecane luna*, *Pristina aequisetata*);
- хищники (*Euplotes patella*, *Planaria*);
- фильтраторы (*Vorticella microstoma*, *Rotaria elongata*).

Исследование выявило, что в составе гидробиоценоза встречаются виды, представленные у поверхности биофильтра с максимальной численностью (56,5 %), и виды, увеличивающие свою численность на большей глубине биофильтра (43,5 %). Например, доминирующий вид среди коловраток – *Rotaria elongata* (Weber, 1888) с максимальной численностью 18 929,76 тыс. экз./м² – отмечался в более глубоких слоях биофильтра.

Сравнивая характеристики гидробиоценоза биофильтров, эксплуатируемых для очистки коммунально-бытовых сточных вод (по [13]) с аналогичными характеристиками в биофильтре рыбоводной установки, можно отметить значительную разницу в структуре, количественной представленности видов на разных глубинах биофильтра. Для биофильтра рыбоводной установки отмечено отсутствие явного меньшего видового разнообразия в поверхностном слое при больших численностях видов, среди которых преобладали полисапробные формы. Более чем у половины видов гидробиоценоза в биофильтре рыбоводной установки наибольшая численность отмечалась в поверхностном слое. При этом среди них отмечались в основном β -мезосапробные формы (β).

Список источников

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture Sustainability in action. Rome, 2020. URL: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb1213t> (дата обращения: 15.12.2020).
2. МР 2.3.1.2432–08. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: метод. реком. М., 2009. 37 с.
3. FAO. 2024. Краткий обзор. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры – 2024. «Голубая трансформация» в действии. URL: <https://doi.org/10.4060/cd0690ru> (дата обращения: 25.06.2025).
4. The state of world fisheries and aquaculture 2022. Part 4 Emerging issues and outlook. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9df19f53-b931-4d-04-acd3-58a71c6b1a5b/content/sofia/2022/fisheries-and-aquaculture-projections.html> (дата обращения: 25.06.2025).
5. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. URL: <https://www.fao.org/interactive/state-of-fisheries-aquaculture/2020/en/> (дата обращения: 15.12.2022).
6. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Статистика рыболовства и аквакультуры за 2017 год. URL: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca5495t> (дата обращения: 20.02.2020).
7. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Статистика рыболовства и аквакультуры за 2016 год. URL: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/I9942T> (дата обращения: 20.02.2020).
8. Киселев А. Ю. Биологические основы и техноло-

гические принципы разведения и выращивания объектов аквакультуры в установках с замкнутым циклом водообеспечения: автореферат дис. ... д-ра биол. наук. М.: ВНИИПРХ, 1999. 62 с.

9. Конкретные типы биофильтров // Библиотека фермера-рыбовода. URL: <https://biblio.arktifiksh.com/index.php/ustanovki-zam/2573-konkretnye-tipy-biofiltrov> (дата обращения: 30.04.2025).

10. Выращивание рыбы в установках замкнутого водоснабжения: метод. рек. / сост. Гуркина О. А., Руднева О. Н., Рубанова М. Е. Саратов: Сарат. источник, 2024. 62 с.

11. Олейник Г. Н., Старосила Е. Н. Микробиологическая характеристика водоемов с высокой антропогенной нагрузкой // Гидробиолог. журн. 2005. № 4. С. 70–81.

12. Мошарова И. В. О взаимосвязи численности активного бактериопланктона и продукционного потенциала различных водных экосистем // Наука и образование: материалы Всерос. науч.-практ. конф. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2016. С. 126–129.

13. Кутикова Л. А. Фауна аэротенков (Атлас). Л.: Наука, 1984. 264 с.

14. Заварзин Г. А. Микробиология двадцать первому

веку. М., 1981. 68 с.

15. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / под ред. В. А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.

16. Пат. № RU 215 079 U1, Российская Федерация, МПК С12Q 1/24 (2006.01). Устройство для отбора гидробиологических проб перифитона в условиях работающих биофильтров рыбоводных установок замкнутого водооборота / Калайда М. Л., Хамитова М. Ф.; № 2022124046; заявл. 12.09.2022; опубл. 28.11.2022.

17. Калайда М. Л., Хамитова М. Ф. Гидробиология: учеб. пособие. СПб.: Проспект Науки, 2013. 192 с.

18. Иванов С. М. Биоценозы обрастаний в системах биологической очистки: дис. ... д-ра биол. наук. М., 2019. 319 с.

19. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. П., Репин Б. П. Очистка производственных сточных вод в аэротенках. М., 1973. 223 с.

20. Sladeczek V. System of water quality from biological point of view // Ergebnisse der Limnologie. Stuttgart, 1973. 218 p.

References

1. FAO. *The State of World Fisheries and Aquaculture Sustainability in action*. Rome, 2020. Available at: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb1213t> (accessed: 15.12.2020).

2. MR 2.3.1.2432–08. *Normy fiziologicheskikh potrebnostej v energii i pishchevyh veshchestvah dlya razlichnyh grupp naseleniya Rossijskoj Federacii: metodicheskie rekomendacii* [MP 2.3.1.2432–08. Norms of physiological energy and nutritional requirements for various population groups of the Russian Federation: methodological recommendations]. Moscow, 2009. 37 p.

3. FAO. 2024. *Kratkij obzor. Sostoyanie mirovogo rybolovstva i akvakul'tury – 2024. «Golubaya transformaciya» v dejstvii* [FAO. 2024. A brief overview. The state of global fisheries and aquaculture – 2024. “The blue transformation” in action]. Available at: <https://doi.org/10.4060/cd0690ru> (accessed: 25.06.2025).

4. *The state of world fisheries and aquaculture 2022. Part 4 Emerging issues and outlook*. Available at: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9df19f53-b931-4d04-acd3-58a71c6b1a5b/content/sofia/2022/fisheries-and-aquaculture-projections.html> (accessed: 25.06.2025).

5. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020*. Available at: <https://www.fao.org/interactive/state-of-fisheries-aquaculture/2020/en/> (accessed: 15.12.2022).

6. *Prodovol'stvennaya i sel'skohozyajstvennaya organizaciya Ob'edinennyh Nacij. Statistika rybolovstva i akvakul'tury za 2017 god* [Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fishing and aquaculture statistics for 2017]. Available at: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca5495t> (accessed: 20.02.2020).

7. *Prodovol'stvennaya i sel'skohozyajstvennaya organizaciya Ob'edinennyh Nacij. Statistika rybolovstva i akvakul'tury za 2016 god* [Food and Agriculture Organization of the United Nations. Fishing and aquaculture statistics for 2016]. Available at: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/I9942T> (accessed: 20.02.2020).

8. Kiselev A. Yu. *Biologicheskie osnovy i tekhnologicheskie principy razvedeniya i vyrashchivaniya ob'ektov akvakul'tury v ustanovkah s zamknutym ciklom vodoobes-*

pecheniya. Avtoreferat dis. ... d-ra biol. nauk [Biological bases and technological principles of breeding and cultivation of aquaculture facilities in installations with a closed water supply cycle. Abstract of the dissertation. ... Doctor of Biology]. Moscow, VNIIPRH, 1999. 62 p.

9. Конкретные типы биофильтров [Specific types of biofilters]. *Библиотека фермера-рыбовода*. Available at: <https://biblio.arktifiksh.com/index.php/ustanovki-zam/2573-konkretnye-tipy-biofiltrov> (accessed: 30.04.2025).

10. *Vyrashchivanie ryby v ustanovkah zamknutogo vodosnabzheniya: metodicheskie rekomendacii* [Fish farming in recirculating aquaculture systems: guidelines for students majoring in Aquatic Bioresources and Aquaculture]. Sostaviteli Gurkina O. A., Rudneva O. N., Rubanova M. E. Saratov, Saratovskij istochnik Publ., 2024. 62 p.

11. Olejnik G. N., Starosila E. N. Микробиологическая характеристика водоемов с высокой антропогенной нагрузкой [Microbiological characteristics of reservoirs with high anthropogenic load]. *Gidrobiologicheskij zhurnal*, 2005, no. 4, pp. 70–81.

12. Mosharova I. V. O vzaimosvyazi chislenosti aktivnogo bakterioplanktona i produkcionnogo potenciala razlichnyh vodnyh ekosistem [On the relationship between the abundance of active bacterioplankton and the productive potential of various aquatic ecosystems]. *Nauka i obrazovanie: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. Murmansk, Izd-vo MGTU, 2016. Pp. 126–129.

13. Kutikova L. A. *Fauna aerotנקov (Atlas)* [Fauna of aerotanks (Atlas)]. Leningrad, Nauka Publ., 1984. 264 p.

14. Zavarzin G. A. *Mikrobiologiya dvadcat' pervomu veku* [Microbiology for the twenty-first century]. Moscow, 1981. 68 p.

15. *Rukovodstvo po metodam gidrobiologicheskogo analiza poverhnostnyh vod i donnyh otlozhenij* [Guidelines on methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments]. Pod redakciej V. A. Abakumova. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1983. 240 p.

16. Kalajda M. L., Hamitova M. F. *Ustrojstvo dlya otbora gidrobiologicheskikh prob perifitona v usloviyah rabo-*

tayushchih biofil'trov rybovodnyh ustanovok zamknutogo vodooborota [A device for taking hydrobiological samples of periphyton in the conditions of operating biofilters of closed-circuit fish hatcheries]. Patent № RU 215 079 U1, Rossijskaya Federaciya, MPK C12Q 1/24 (2006.01); № 2022124046; 28.11.2022.

17. Kalajda M. L., Hamitova M. F. *Gidrobiologiya: uchebnoe posobie* [Hydrobiology: a textbook]. Saint Petersburg, Prospekt Nauki Publ., 2013. 192 p.

18. Ivanov S. M. *Biocenozy obrastanij v sistemah biologicheskoy ochistki. Dissertaciya ... d-ra biol. nauk* [Bioce-

noses of fouling in biological treatment systems. Dissertation ... of Dr. biol. sciences]. Moscow, 2019. 319 p.

19. Karelin Ya. A., Zhukov D. D., Zhurov V. P., Re-pin B. P. *Ochistka proizvodstvennyh stochnyh vod v aerotenkah* [Industrial wastewater treatment in aerotanks]. Moscow, 1973. 223 p.

20. Sladeczek V. System of water quality from biological point of view. *Ergebnisse der Limnologie*. Stuttgart, 1973. 218 p.

Статья поступила в редакцию 25.11.2025; одобрена после рецензирования 15.04.2026; принята к публикации 27.05.2026
The article was submitted 25.11.2025; approved after reviewing 15.04.2026; accepted for publication 27.05.2026

Информация об авторах / Information about the authors

Мадина Фархадовна Хамитова – кандидат биологических наук; доцент кафедры водных биоресурсов и аквакультуры; Казанский государственный энергетический университет; it-sk@bk.ru

Madina F. Khamitova – Candidate of Biology; Assistant Professor of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture; Kazan State Power Engineering University; it-sk@bk.ru

Марина Львовна Калайда – доктор биологических наук, профессор; заведующий кафедрой водных биоресурсов и аквакультуры; Казанский государственный энергетический университет; kalayda4@mail.ru

Marina L. Kalaida – Doctor of Biology, Professor; Head of the Department of Aquatic Bioresources and Aquaculture; Kazan State Power Engineering University; kalayda4@mail.ru

