Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 67, № 1. С. 96–115.
Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2024. Vol. 67, no 1. P. 96–115.

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Обзорная статья

УДК 639.3.05

DOI: https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-67-09

Использование биофлок-технологии при подращивании гидробионтов на базе установок замкнутого водоснабжения: возможности применения технологии в условиях Дальнего Востока России

Сергей Александрович Низяев [1], Елена Максимовна Латковская [2], Юрий Андреевич Ревин [3]

[1,2] Сахалинский государственный университет, Южно-Сахалинск, Россия

[3] Ассоциация социальных предпринимателей Сахалинской области, Южно-Сахалинск, Россия

[1]nizyaev.sa@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0001-7426-1535

[2] elena-sazon02@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0002-1198-0038

[3] ase65@bk.ru

Аннотация. Проведен анализ преимуществ и недостатков аквакультурных систем, использующих микроорганизмы разной трофической принадлежности для контроля качества воды при содержании морских гидробионтов в замкнутом цикле. Обсуждаются элементы азотного и углеродного обмена в замкнутом цикле, особенности и потребности в ресурсах, необходимых для достижения и стабильности гидрохимических параметров, приемлемых для подращивания гидробионтов. Особое место отводится рассмотрению технологии биофлок (BioFloc Technology – BFT), которая на Дальнем Востоке России пока не используется. Системы BioFloc существенным образом отличаются от традиционных систем кормления гидробионтов и контроля гидрохимических параметров в УЗВ и представляют собой технологический прорыв в аквакультуре. Выявленные ограничения и недостатки использования биофлоков в индустриальной аквакультуре для северных районов заключаются в повышении энергопотребления для активной аэрации, увеличении эмиссии CO_2, ограниченном перечне бореальных видов, дополнительном контроле видового состава микроорганизмов. Тем не менее представляется, что для субарктических регионов Дальнего Востока использование биофлоков в индустриальной аквакультуре имеет ряд неоспоримых преимуществ, значительно снижая капитальные и эксплуатационные расходы на содержание морских гидробионтов при их правильном выборе для культивирования, а также нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: индустриальная аквакультура, УЗВ, биотехнология, биофлок, биобезопасность

© Низяев С.А., Латковская Е.М., Ревин Ю.А., 2024

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта «Приоритеты 2030 ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет».

Для цитирования: Низяев С.А., Латковская Е.М., Ревин Ю.А. Использование биофлок-технологии при подращивании гидробионтов на базе установок замкнутого водоснабжения: возможности применения технологии в условиях Дальнего Востока России // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 67, № 1. С. 96–115.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Review article

DOI: https://doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-67-09

The use of bioflock technology in the cultivation of aquatic organisms on the basis of recirculating water supply installations: the possibilities of using the technology in the conditions of the Russian Far East

Sergey A. Nizyaev [1], Elena M. Latkovskaya [1], Yury A. Revin [3]

[1,2] Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

[3] Association of Social Entrepreneurs of the Sakhalin Region, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

[1] nizyaev.sa@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0001-7426-1535

[2] elena-sazon02@yandex.ru, http://orcid.org/ http://orcid.org/0000-0002-1198-0038

[3] ase65@bk.ru

Abstract. The article analyzes the advantages and disadvantages of aquaculture systems that use microorganisms of different trophic affiliation to control water quality when keeping marine aquatic organisms in a closed cycle. The elements of nitrogen and carbon exchange in a closed cycle, the features and requirements for resources necessary to achieve and stable hydrochemical parameters acceptable for the cultivation of hydrobionts are discussed. A special place is given to the consideration of the BioFloc Technology (BFT), which is not yet used in the Russian Far East. BioFloc systems differ significantly from traditional systems for feeding aquatic organisms and monitoring hydrochemical parameters in recirculating aquaculture and represent a technological breakthrough in aquaculture. The identified limitations and disadvantages of the use of bioflocks in industrial aquaculture for the northern regions are an increase in energy consumption for active aeration, an increase in CO2 emissions, a limited list of boreal species, and additional control of the species composition of microorganisms. Nevertheless, it seems that for the subarctic regions of the Far East, the use of bioflocks in industrial aquaculture has a number of undeniable advantages, significantly reducing the capital and operating costs for the maintenance of marine aquatic organisms if they are correctly selected for cultivation, as well as the burden on the environment.

Keywords: industrial aquaculture, RAS, biotechnology, biofloc, biosafety

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the project «Priorities 2030 of Sakhalin State University».

For citation: Nizyaev S.A., Latkovskaya E.M., Revin Y.A. The use of bioflock technology in the cultivation of aquatic organisms on the basis of recirculating water supply installations: the possibilities of using the technology in the conditions of the Russian Far East. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2024; 67(1):96–115. (in Russ.).

Введение

Развитие индустрии аквакультуры в значительной мере опережает рост рыболовства, который последние десятилетия находится в состоянии некоторой стагнации [1]. По последним данным FAO, рыбные ресурсы продолжают сокращаться из-за чрезмерного вылова рыбы, загрязнения окружающей среды, плохого управления и других факторов. Доля рыбных запасов, находящихся в пределах биологически устойчивых уровней, снизилась с 90 % в 1974 г. до 64,6 % в 2019 г. [1]. Сектор промыслового рыболовства сегодня недостаточен для удовлетворения потребностей растущего населения Земли, поэтому существует потребность в устойчивых технологиях производства аквакультуры для преодоления огромных различий между спросом и предложением. Аквакультура в плане продовольственной безопасности доказанно является более перспективным направлением, чем промышленное рыболовство, что подтверждается ростом аквакультурного производства в мире за последние десятилетия, близким к экспоненциальному. Общие тенденции и развитие технологических возможностей по наращиванию производства гидробионтов позволяют определить аквакультуру как направление получения продовольствия, которое по сравнению с промышленным рыбным хозяйством является более устойчивым, выгодным и контролируемым.

Несмотря на стремительный рост, аквакультурное производство имеет свои проблемы и ограничения, оказывающие влияние на ее расширение и устойчивость и являющиеся побуждающей причиной усовершенствования производственных технологий [2–4]. В основном они связаны с ресурсным обеспечением производства и экологическими аспектами этой деятельности. В плане потребности в ресурсах определяющей называют стоимость земли и основных компонентов кормов для коммерческой аквакультуры [5, 6]. Затраты на корма составляют не менее 50 % от общих затрат на производство продукции аквакультуры, что обусловлено преимущественно стоимостью белкового компонента коммерческих рационов [7, 8]. Существует множество исследований в направлении снижения стоимости белкового компонента или его замены более доступным источником [9–11]. Помимо коммерческих выгод замена в кормах гидробионтов белка животного происхождения на компоненты, продуцируемые в системе, снижает загрязнение окружающей среды отходами, образующимися при выращивании этих животных кормов.

Экологическая составляющая для аквакультурных производств заключается прежде всего в загрязнении окружающей среды отходами, используемыми химикатами и излишками кормов, представляющими угрозу для местных экосистем [12]. Кроме того, плотные поселения гидробионтов в аквакультуре могут способствовать быстрому распространению болезней и патогенов, снижая эффективность производства, а при интродукции в естественную среду обитания инфицировать диких хозяев [13].

Одним из направлений, позволяющих оптимизировать производство и добиться снижения ущерба окружающей среде, причиняемого аквакультурой [14], является использование технологии «Биофлок» (Biofloc Technology, BFT). Общая идеология развития этой технологии появилась в 70-х гг. прошлого века. Согласно Emerenciano M. et. al. [15] BFT была впервые разработана в начале 1970-х гг. в Ifremer-COP (Французский научно-исследовательский институт эксплуатации моря, Океанический центр Тихого океана), она основана на включении в производственную экосистему микробных сообществ. Миксы микроорганизмов имеют возможность ассимилировать метаболиты для собственного роста, предотвращая загрязнение среды отходами жизнедеятельности выращиваемых животных и позволяя использовать

производство микробного белка как дополнительный источник белковой пищи [16]. Это является своего рода аналогом миксов автотрофных и гетеротрофных микроорганизмов, которые в природной водной среде могут образовывать особую микросферу, ассоциированную вокруг фитопланктонной клетки, иногда называемую фикосфера («phycosphere») [17].

Основой равновесия в любой системе интенсивной аквакультуры является круговорот базовых химических элементов, составляющих сложные органические соединения, участвующие в жизни аквакультурных сообществ. Сложность этих процессов зависит от сложности поддерживаемой в аквакультурном хозяйстве экосистемы и способов ее контроля. Прежде чем судить о возможностях применения технологии в различных условиях, разберемся в принципах организации традиционных и биофлоковых систем, организованных в прудах (бассейнах) и установках замкнутого водоснабжения (УЗВ), или «recirculatory aquaculture system» (RAS) [18]. Интерес к закрытым системам аквакультуры растет в основном из-за биобезопасности (снижения опасности инвазий патогенных видов) [19], экологических и маркетинговых преимуществ. Поскольку мы пытаемся рассмотреть особенности расширения технологии BFT на условия морских вод северных районов (районы Дальнего Востока России), то наш обзор более подробно будет освещать варианты индустриальной аквакультуры в морских УЗВ и установках с нулевым водообменом.

Основные технологии, используемые при подращивания гидробионтов, и условия, определяющие их применение

Любая аквакультурная система характеризуется особенностями обращения биогенных элементов, основным из которых является азот. Цикл азота представляется важнейшим в причастности к органической природе, поскольку, переходя от азота в атмосфере к формам, используемым растениями и животными, и обратно, он имеет ряд трудно контролируемых промежуточных токсических соединений. Вариантность решений контроля над циклом азота, помимо условий содержания объекта аквакультуры, в основном и является источником многообразия аквакультурных систем и поиска новых устойчивых способов контроля качества воды. Это отражается в развитии аквакультуры от простых, но затратных систем к более сложным, но более устойчивым и экономически эффективным.

Основным источником азота в аквакультурных системах является корм (его белковый компонент). Азот, содержащийся в корме или питательных добавках в соответствии с коэффициентом усвоения, потребляется целевым организмом и выводится как продукт катаболизма белков в виде аммиака (NH_3) или водной ионизированной форме аммония (NH_4^+). Аммиак существует как одна из сторон равновесия, зависящего от pH и температуры. Во всем диапазоне pH, наиболее часто встречающемся летом в морских водах Японского и Охотского морей (от 7,4 до 8,2 в зал. Восток Японского моря [20] и от 7,5 до 8,3 в зал. Анива Охотского моря [21]), большая доля азота присутствует в воде в виде аммиака в газообразной форме, особенно в гидрологическое лето при повышении температуры. Организм усваивает в среднем около 25 % содержащегося в корме азота, а экскреция остальной его части (75 %) может быть разделена на растворимую фракцию (62 %) и фракцию твердых частиц (13 %) [22–24].

Океанический углеродный цикл содержит растворенные и взвешенные формы как неорганического углерода (CO_2, H_2CO_3, HCO_3^-, CO_3^{2-}), так и органического (белки, липиды, углеводы и нуклеиновые кислоты). В углеродном круговороте морских экосистем происходит преобразование и перераспределение форм углерода между неживой и живой материей. В искусственных аквакультурных системах используется часть этого цикла, действующего между имеющимися в системе объектами и средами. Остальная часть цикла при необходимости замещается искусственно привнесенными компонентами, объединяющими в себе готовый результат этой ее части, как, например, углеродсодержащие корма, произведенные за пределами углеродного цикла аквакультурной системы. Неорганический углерод поступает в

индустриальную систему как продукт дыхания целевого объекта, а органический – в составе корма в виде простых и сложных углеводов, источников энергии. Контроль углеродного цикла не настолько важен, как азотного, поскольку углерод гораздо проще выводится из системы, а оставаясь в ней, не образует токсичных соединений, способных в повышенных концентрациях привести целевые организмы к критически низким темпам развития. Но именно углерод является обязательным компонентом контроля неорганического азота в гетеротрофных системах аквакультуры [25].

Автотрофные бактериальные системы

Автотрофные бактерии (фото- и хемо-) широко распространены в природных водоемах, являясь важной частью биогеохимических циклов всех биогенных элементов как в аэробных, так и в анаэробных условиях среды. В классических рециркуляционных аквакультурных системах, использующих традиционные, наиболее простые решения для удаления токсичного аммиака, обычно применяются биофильтры с автотрофными нитрифицирующими бактериями. Установки замкнутого водоснабжения используют технологию переработки и повторного использования воды после удаления взвешенных веществ и метаболитов с помощью биологической фильтрации, в основе которой лежит процесс нитрификации [26] (рис. 1). В процессе нитрификации происходит ступенчатое окисление аммиака до нитрат-иона [27]. В интенсивных рециркуляционных системах с суточной заменой воды не более 10 % от общего объема и необходимостью удаления из системы твердых отходов (фекалий), ненужных питательных веществ (до 75 % вносимого с кормом азота) накопление продуктов нитрификации в воде со временем неизбежно. Недостаток гетеротрофных денитрифицирующих бактерий в системе препятствует восстановлению окисленных соединений азота, что негативно отражается на качестве воды [28, 29]. Кроме того, исследования показали, что длительное воздействие высоких уровней нитратов может ухудшить показатели роста и здоровья гидробионтов [30, 31]. Поэтому крайне важно поддерживать незначительный уровень нитратов, что в системах с абсолютным преобладанием нитрифицирующих автотрофов достичь довольно сложно.

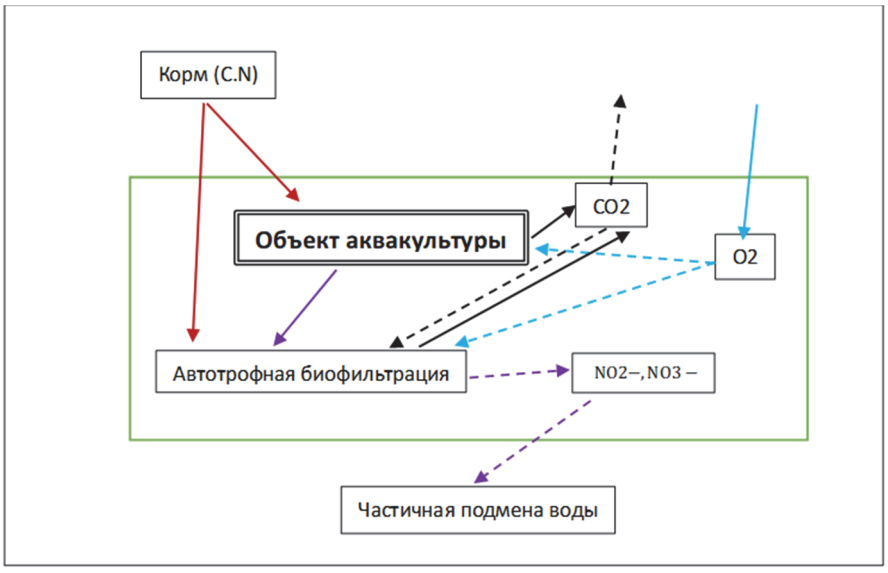

Рис. 1. Динамика основных компонентов в аквакультурной системе
с рециркуляцией воды при автотрофной нитрификации
Fig. 1. Dynamics of the main components in an aquaculture system with water recirculation
in autotrophic nitrification

Рост гетеротрофных бактерий, как и накопление органического углерода, в этих системах сводятся к минимуму за счет быстрого удаления твердых веществ и остатков корма из системы [32]. Образование бактериальной биомассы автотрофами в отличие от гетеротрофных процессов происходит в гораздо меньших количествах. Цикл углерода в системе сводится к усвоению целевым организмом получаемого с кормом углерода и выделения в процессе дыхания неорганического углерода (CO_2), который используется автотрофными бактериями для питания, а избыток остается в воде, снижая pH, или удаляется в атмосферу. Также колонии автотрофов потребляют значительное количество щелочи и в большом количестве образуют углекислый газ [27]. Для воды с низкой начальной щелочностью это может стать серьезной проблемой, требующей добавления щелочи в виде бикарбоната натрия, извести, гидроксида натрия для поддержания адекватной концентрации, особенно для систем с ограниченным водообменом.

Таким образом, для работы автотрофных бактериальных систем, реализованных в классических УЗВ, необходимо следующее оборудование: резервуары для выращивания; дорогостоящая система фильтров (механические, биофильтры, УФ-установки); система аэрации; система водоснабжения (резервуары-отстойники, насосы для перекачки воды); автономная система генерации электроэнергии [26].

Требуемые ресурсы: источник воды (частичная ежесуточная подмена воды); постоянное бесперебойное электроснабжение (в случае отключения электроэнергии требуется резервное); корм с высоким содержанием белка, содержащий все необходимые минералы и витамины; комплекты для тестирования воды.

В настоящее время это пока наиболее распространенная индустриальная система, и в подавляющем большинстве случаев она является основным типом производственных аквакультурных систем в северных районах (Дальний Восток России). Система после запуска довольно просто и удобно управляется. При налаженном тестировании ключевых параметров устойчивость среды достигается хорошей работой систем фильтрации и своевременной частичной подменой воды в объемах, позволяющих стабилизировать параметры в требуемом диапазоне. Обеспечивается снижение прямых эксплуатационных затрат, связанных с борьбой с хищниками и паразитами [26]; снижение рисков, связанных с климатическими факторами, болезнями и воздействием паразитов.

К недостаткам автотрофных бактериальных систем можно отнести высокие капитальные затраты на рециркуляционное оборудование (фильтры, насосы) и его эксплуатацию; высокую стоимость кормов (белковой части); для северных районов энергетические затраты на подогрев ежесуточно подменяемой воды. В плане влияния на экосистемы сбрасываемые воды, насыщенные биогенами, способствуют эвтрофикации водоемов, куда осуществляется их сброс. Иными способами удалить метаболиты и продукты их переработки автотрофами из системы невозможно.

Фотоавтотрофные системы

Использование в аквакультурных системах фитопланктона (микроводорослей) для поглощения неорганического азота является более продвинутой технологией при подращивании аквакультурных объектов по сравнению с простой бактериальной нитрификацией. В этой системе помимо автотрофных бактерий, которые утрачивают свою доминирующую роль, в качестве основного компонента участвует фотосинтезирующий элемент, позволяющий, помимо нитрификации продуктов метаболизма целевого объекта, восстанавливать и усваивать нитритный и нитратный азот (рис. 2). Поглощение неорганического азота фитопланктоном из водной толщи в фотоавтотрофной системе для аквакультуры является основным путем удаления азота из системы [22]. Аммиак является предпочтительным субстратом азота для фитопланктона, и только после его истощения будут ассимилированы накопленные

количества нитратов [33]. Ассимиляция и включение нитратов является энергетически менее выгодным путем питания азотом для фитопланктона. На каждый грамм аммиачно-азотного раствора, перешедшего в биомассу водорослей, расходуется 18,07 г углекислого газа, а на каждый грамм нитрат-азота – 24,4 г углекислого газа [27]. Значит, 15,14 и 19,71 г кислорода образуются, соответственно, на грамм аммиачно-азотной и на грамм нитратно-азотной смеси. Наконец, на грамм аммиачного или нитратного азота образуется значительное количество биомассы водорослей – 15,85 г. Указанные величины соответствуют стехиометрическим уравнениям происходящих химических процессов. В условиях индустриальных установок и прудовых хозяйств суммарные и удельные показатели этих процессов, помимо доступного количества питательных веществ, зависят от уровня освещения.

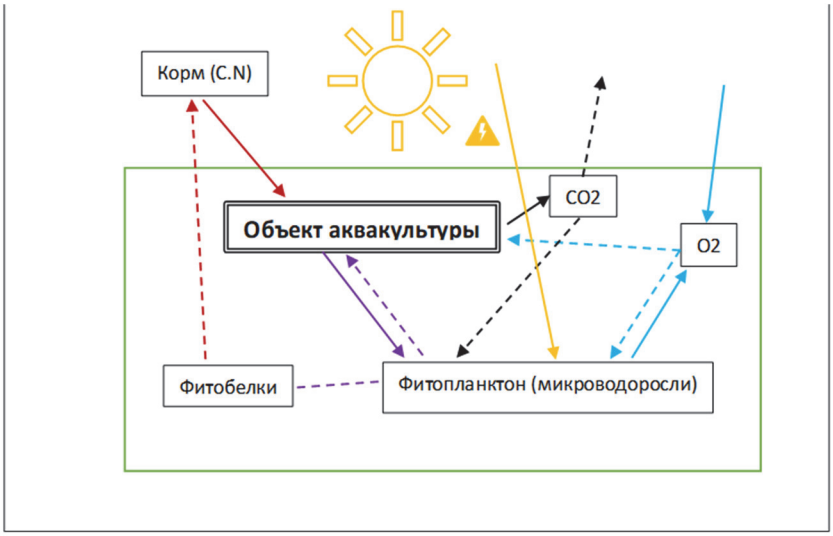

Рис. 2. Динамика основных компонентов в аквакультурной системе при фотоавтотрофной нитрификации
Fig. 2. Dynamics of the main components in the aquaculture system during photoautotrophic nitrification

Фотоавтотрофная система может являться частью биофлоковой системы или ее переходным состоянием. Суточные колебания концентрации растворенного кислорода и pH, несмотря на интенсивную аэрацию, являются еще одной характеристикой биофлоковых систем, в которых преобладает активность водорослей. Обычно в прудах при суточной норме кормления менее 300 кг/га (30 г/м^2) активность водорослей является основным фактором, контролирующим качество воды. Фотоавтотрофная система является базовой технологией для выращивания микроводорослей – критически необходимых кормов, требуемых для подращивания молоди в аквакультурных хозяйствах [34, 35].

Но микроводоросли, правда не все, могут также принимать и состояние гетеротрофной культуры. В этом состоянии они поглощают внешний органический углерод для синтеза биомассы и размножаются в темноте [36]. Внешние неорганические источники углерода и энергия света приобретают характер второстепенных источников, фотосинтез снижается, но плотность клеток микроводорослей и их биомасса относительно увеличиваются [37].

Особым случаем объединения фотоавтотрофной системы с биофлоковой аквакультурой является аквапоника. Аквапоника – это интегрированная политрофная система, сочетающая в себе элементы аквакультуры с циркуляционной аквакультурой, такой как BFT, реализованной в системе замкнутой аквакультуры (УЗВ) [38, 39]. Переход от фотоавтотрофной системы к бактериальной гетеротрофной управляемо или неуправляемо происходит при недостатке

света в совокупности с увеличением суточной нормы кормления (органический углерод), высвобождающим дополнительные неиспользуемые питательные вещества, и минимум пятикратным увеличением мощности аэрации [40]. Фотоавтотрофные системы могут существовать без использования фильтрующего оборудования, но задача освобождения воды от твердых нерастворимых отходов остается для них актуальной.

Таким образом, для работы фотоавтотрофных систем, реализованных в индустриальных установках с нулевым водообменом или с частичной заменой воды, необходимо следующее оборудование: резервуары для выращивания; система аэрации; источники освещения с нужной длиной волны; автономная система генерации электроэнергии; желательна система перемешивания (эмуляция течения).

Требуемые ресурсы: источник воды (при частичной замене воды); электроэнергия; корм с высоким содержанием белка, содержащий все необходимые минералы и витамины (для целевого объекта животного происхождения); комплекты для тестирования воды.

Фотоавтотрофные индустриальные системы в северных районах (Дальний Восток) как производственные аквакультурные системы не используются. Систему легко запустить, но стабилизировать параметры воды сложно из-за суточных колебаний pH, кислорода и углекислого газа. В совокупности со значительным потреблением электроэнергии это является основным недостатком системы. Однако, как уже говорилось, фотоавтотрофная система является единственной аквакультурной системой для производства фитокормов. Наиболее оправдано ее использование для выращивания растительноядных видов гидробионтов, что в первую очередь связано со снижением затрат на приобретение кормов [41]. Кроме того, как во всех индустриальных системах, здесь также снижается уровень проблемы, связанной с борьбой с хищниками и паразитами. Это в свою очередь уменьшает зависимость конечного продукта от антибиотиков и терапевтических средств [26].

Гетеротрофные бактериальные системы (BFT-системы)

Контроль аммиака по гетеротрофному пути часто более стабилен и надежен, чем поглощение водорослями или нитрификация. Бактерии имеют относительный размер около микрометра. Когда они образуют плотную биомассу, она собирается и образует хлопья (биофлоки). Для создания биофлоков необходимы биологические полимерные вещества, которые удерживают компоненты вместе, создавая матрицу, инкапсулирующую клетки. Эта матрица защищает микроорганизмы от хищников, обеспечивает прямой доступ к питательным веществам и работает как субстрат [42]. Существует несколько механизмов связывания или факторов, влияющих на образование хлопьев, их плотность и стабильность. Многие организмы покрыты или выделяют внеклеточный полимер, состоящий из полисахаридов, белков, гуминовых соединений и т.д. Эти слизистые молекулы действуют как клей, соединяющий частицы вместе. В конечном счете биофлоки представляют собой гетерогенные макроагрегаты планктонного материала в толще воды, представляющие собой консорциум флокообразующих бактерий, диатомовых водорослей, нитчатых микроводорослей, микро- и макробеспозвоночных, простейших, фекалий и несъеденного корма [43]. То есть образование биофлоков – это симбиотический процесс, в котором участвуют водные животные, гетеротрофные бактерии и другие виды микроорганизмов в воде.

Основная идея технологии биофлоков заключается в том, чтобы создать структурированную биологическую среду в аквакультурной экосистеме, в которой многообразные микроорганизмы выполняют функции естественного биологического фильтра. Биофлоки служат фильтрами, поглощая частицы органического происхождения, неорганический азот и другие биогены, которые могут негативно влиять на обитателей экосистемы, тем самым улучшая качество воды, осуществляя биоремедиацию [44]. При этом несъеденный корм, фекалии и избыточные питательные вещества превращаются в съедобные биофлоки, также называемые

одноклеточными белками (SCP) [43] (рис. 3). В большинстве BFT-систем SCP слабо связаны бактериальной слизью, образуя видимые плавающие комки, которые являются питательным пищевым материалом для выращиваемых гидробионтов. Другой способ использования образовавшихся белков – сбор и переработка бактериальных колоний в биофлоковый шрот или муку, чтобы в дальнейшем использовать эти продукты в виде ингредиентов в кормах [45].

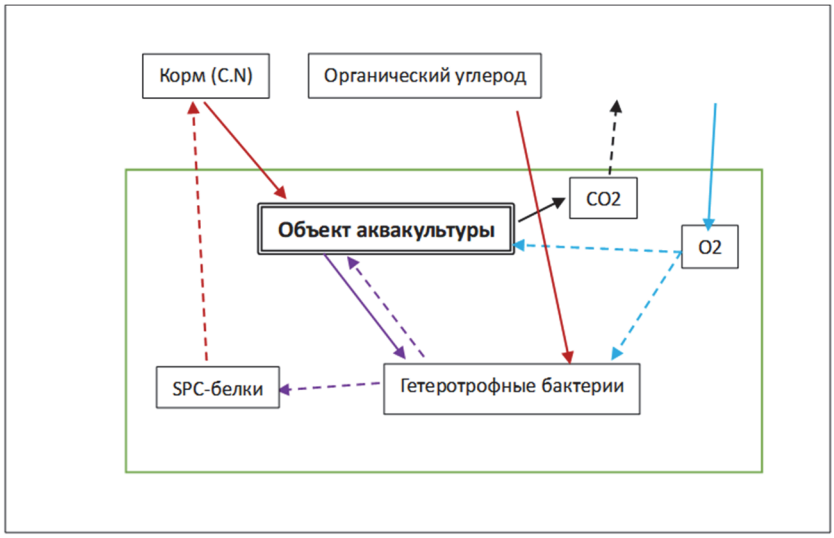

Рис. 3. Динамика основных компонентов в аквакультурной системе при гетеротрофной нитрификации
Fig. 3. Dynamics of the main components in the aquaculture system during heterotrophic nitrification

BFT-системы являются системами замкнутого типа, без рециркуляции воды с практически нулевым водообменом. Вода необходима лишь для восполнения объемов естественных испарений. Как отмечают некоторые исследователи, потребление воды в системе на основе биофлоков на 40 % ниже, чем в системе замкнутого цикла аквакультуры (УЗВ) [46]. То есть идеальная BFT-система представляет собой замкнутый контур, который поступающие извне органические и неорганические соединения, исключая газы, покидают только в виде биомассы целевого объекта аквакультуры. Это существенным образом экономит потребляемые системой ресурсы, особенно кормовые. Гетеротрофные бактерии, потребляемые целевыми объектами в виде SCP, т.е. наиболее дорогостоящего в кормовом рационе белкового компонента, имеют максимальную скорость роста, значительно превышающую автотрофные нитрификаторы. Такую, что в системах даже с относительно умеренным соотношением углерода к азоту (C/N) гетеротрофы способны превосходить и в значительной степени ингибировать нитрификацию. Это означает, что в чистой гетеротрофной системе не должны образоваться нитриты или нитраты [27]. Иммобилизация аммония гетеротрофными бактериями происходит гораздо быстрее, поскольку скорость роста и выход микробной биомассы на единицу субстрата у гетеротрофов в 10 раз выше, чем у нитрифицирующих бактерий [47]. На ряд других параметров (соленость, температура, pH, растворенный кислород, TAN (общий аммиачный азот), концентрация нитритов ($p>0,05$) плотность биохлопьев не оказывает особого влияния, но существенно влияет на концентрацию нитратов и щелочность ($p<0,05$) [48].

Основные факторы, влияющие на скорость нитрификации, также играют доминирующую роль в гетеротрофном росте бактерий. К ним относятся: pH, щелочность, температура, кислород, аммиак и соленость [32]. Биофокальная система по сравнению с другими наиболее сложна в экосистемном плане, поскольку потенциально может включать в себя довольно широкий список видов-симбионтов, от фитопланктона до мелких ракообразных и червей

[49]. Это многообразие позволяет формировать экосистему с несколькими трофическими уровнями, но с целевым объектом аквакультуры вверху пищевой цепи. Некоторые исследователи приходят к выводу, что смешанный биофлок, преимущественно состоящий из автотрофных бактерий и микроводорослей, также известный как миксотрофная система, достигает более высоких значений FCR (кормовой коэффициент) по сравнению с системами с более высоким содержанием гетеротрофных бактерий [50, 51].

Однако чем сложнее и более структурирована система, тем выше ее нестабильность на начальных этапах запуска, что требует от персонала практических навыков и теоретических знаний [52]. При успешном запуске и стабилизации основных параметров система позволяет осуществлять экологически устойчивый контроль за качеством воды и достигать более высокой продуктивности производства. Управление гетеротрофным сообществом основано на регулировании соотношения C/N за счет внесения органического углерода, используемого гетеротрофами для выработки энергии и роста, которое при повышении дает увеличение иммобилизации азота, а при снижении, наоборот, ингибирует этот процесс [25, 40].

Чтобы создать оптимальную среду культивирования биофлока, необходимо учитывать, регулярно контролировать и поддерживать несколько ключевых параметров [49]. Так, рост биомассы гетеротрофов требует интенсивной аэрации, температуры не менее 20 ºС, близкого к нулю общего аммиачного азота, нулевой концентрации нитритов, низких концентраций нитратов и фосфатов (<20 мг/л). Важным параметром является концентрация взвешенных веществ (TSS), которая не должна превышать 1000 мг/л и чаще всего составлять менее 500 мг/л [40]. Отсутствие суспензии и перемешивания в системе BFT может создать анаэробную область в резервуаре, что приведет к быстрому потреблению растворенного кислорода. Это, в свою очередь, запустит анаэробные процессы, в результате которых могут выделяться вредные газы, такие как аммиак, сероводород и метан, смертельно токсичные как для гетеротрофного сообщества, так и для выращиваемых гидробионтов [49]. Поэтому для установления БФТ необходимо, чтобы пруд имел покрытие, предотвращающее скопление твердой органики на дне [53].

Таким образом, для работы чистых гетеротрофных систем, реализованных в индустриальных установках с нулевым водообменом, необходимо следующее оборудование: резервуары для выращивания; система интенсивной аэрации; автономная система генерации электроэнергии; желательна система перемешивания (эмуляция течения).

Требуемые ресурсы: электроэнергия; корм, содержащий все необходимые минералы и витамины (для целевого объекта животного происхождения); добавка органического углерода (патока, крахмал, мука ячменная, кукурузная и пр.), карбонаты; комплекты для тестирования воды.

Основные зависимости в рассмотренных по литературным источникам аквакультурных системах, связанные с влиянием факторов, определяющих качество воды, представлены в таблице.

Биофлоковые индустриальные системы в качестве производственных аквакультурных систем в северных районах (Дальний Восток) пока не используются. Технология биофлока разрабатывалась и внедрялась в условиях прудовых хозяйств южных районов, где температурный параметр не требует энергетически затратной корректировки и соответствует уровню оптимального протекания биохимических процессов у бактериальной микрофлоры. Минимальный водообмен поддерживает тепло, и предотвращается колебание температуры [54], что снижает затраты энергии и позволяет выращивать тропические виды в холодных районах. В то же время затраты энергии возрастают из-за интенсивной аэрации.

По мнению некоторых авторов [18, 55], BFT стал многообещающим и устойчивым методом аквакультуры, имеющим значительные экономические и экологические преимущества. Однако в системах BFT все еще существуют проблемы и возможности для улучшения. Это оптимизация источников углерода, управление популяциями микроорганизмов, разработка

точных и надежных инструментов мониторинга критических параметров. Наконец, еще одной проблемой является масштабирование систем BFT до уровня коммерческого производства, оптимизация конструкции системы, методов управления и разработка экономически жизнеспособных производственных моделей.

Степень влияния различных факторов в основных системах контроля качества воды
Degree of influence of various factors in the main water quality control systems

Системы контроля качества воды	Вода	Аэрация	Отходы	Взвешенные вещества (TSS)	Температура	Щелочность	CO_2	NO_2^-, NO_3^-
Автотрофные бактериальные системы	+	+	++	–	–	+	+	++
Фотоавтотрофные системы	–	–(?)	+	–	–	+	–	–
Гетеротрофные бактериальные системы	–	++	–	++	++	+	++	–

Примечание. ++ критическое влияние фактора, + среднее, – отсутствие.

Основные преимущества использования биофлоков в индустриальной аквакультуре для северных районов:

- снижение капитальных затрат для организации производственных процессов;
- экономия на дорогостоящих компонентах корма (белок);
- повышение общей производительности;
- экосистемное управление качеством воды;
- эффективное использование воды;
- экономия на энергии для подогрева воды (отсутствие суточных подмен);
- борьба с болезнями за счет конкуренции с патогенами и поддержания здорового микробного баланса;
- биобезопасность и отсутствие негативного влияния на экологию;
- возможность выращивания тропических видов в северных районах.

Основные негативные моменты использования биофлоков в индустриальной аквакультуре для северных районов:

- повышение энергопотребления для активной аэрации;
- увеличение производства CO_2;
- требовательность к температуре (подходит для ограниченного перечня бореальных видов);
- дополнительный контроль видового состава микроорганизмов.

Особенности выбора целевых объектов аквакультуры при подращивании в биофлоковой системе

Из-за наличия ограничений в работе биофлоковой системы выбор видов имеет определяющее значение для возможности успешного их выращивания [56]. Производительность же работы системы зависит от использования ее преимуществ.

Из ограничений, не связанных с наличием ресурсов, основным и критическим является температурный режим. Только виды, которые могут успешно расти при температуре от

24 до 28 ºС, могут быть объектами аквакультуры в системе с BFT-технологией [49]. Для северных районов, где средняя температура воды в прибрежной зоне летом ниже, чем нижнее пороговое значение работы биофлоковой системы, перечень местных видов существенно органичен. Поэтому лишь немногие виды можно подращивать для дальнейшего пастбищного выращивания в прибрежных морских водах. Помимо температуры биофлоковая система требует обращать внимание и на другие факторы, которые для успешного производства должны удовлетворять одновременно и целевой объект аквакультуры, и микробное сообщество.

Вторым существенным ограничением является наличие в толще воды взвеси (TSS) из биофлоков, которая в больших концентрациях может затруднять дыхание гидробионтов [57–59]. Для некоторых видов прозрачность воды имеет определяющее значение, и животное при высоких TSS не может благополучно не только расти, но и существовать. Нивелировать этот фактор может помочь адаптация BFT-технологии для ее использования с применением вертикальных субстратов [39]. Микробный консорциум в этой модификации системы не распределен равномерно в толще воды, а концентрируется на поверхности вертикальных субстратов в виде биопленок [60]. Микробное сообщество, растущее на вертикальных субстратах, можно контролировать так же, как и в суспендированной биофлоковой системе, путем регулирования соотношения C/N [61].

Главным в биофлоковой, преимущественно гетеротрофной системе является чрезвычайно большое количество бактериальной биомассы, образующейся в результате потребления биогенов и органики. Это, наверное, одно из основных преимуществ биофлоковой системы, имеющее самое прямое отношение к выбору целевого объекта аквакультуры. Белковые тела бактериальных колоний должны осваиваться либо промежуточными, либо конечными потребителями, что существенным образом повышает коэффициент конверсии корма (FCR) и экономит затраты. При отсутствии в системе потребителей этого продукта фермер не только лишается основного преимущества системы, но и рискует потерять контроль над производственной экосистемой в силу нарушения трофических связей. Для использования частиц биофлока и детрита культивируемые виды должны быть по типу питания полностью или частично фильтраторами (сестонофагами) [43]. Для культивирования таких животных, как грунтоеды или соскабливатели, BFT-система абсолютно не предназначена, поскольку образование донного осадка в гетеротрофных системах категорически недопустимо. Адаптация BFT с использованием вертикальных субстратов, которая служит альтернативой взвешенным биофлокам, позволяет не только собирать микробный SCP-белок с поверхности этих субстратов [61], но и использовать селящийся там перифитон [62], т.е. существенно расширяет список целевых объектов аквакультуры по типу питания.

Заключение

Применение биофлок-технологии в сравнительно холодном регионе Дальнего Востока России позволяет существенно упростить подготовку материальной базы для культивирования объектов, что снижает капитальные затраты на детоксикацию воды и делает организацию производства экономически более доступной. Производство может иметь сезонный характер, когда в качестве конечного результата рассматривается жизнестойкая молодь промысловых видов, используемая в дальнейшем для восстановления депрессивных популяций или размещения с целью пастбищного выращивания. Другим положительным эффектом от применения биофлоков является возможность замены белкового компонента корма микробным белком, что существенно снижает стоимость кормов.

Недостатком BFT-систем является ограниченность перечня культивируемых видов, обусловленная необходимостью подбирать объект аквакультуры, способный не только эффективно расти в среде, дружественной для микробных колоний, но и иметь возможность поглощать микробный белок, образующийся в системе. Однако это ограничение нельзя считать

окончательным, поскольку научные изыскания в этом направлении, хотя и не снимут проблему полностью, но могут в значительной мере сгладить этот недостаток. По нашему мнению, это основное практическое приложение исследований в области расширения применимости BFT-технологии в регионах с бореальным климатом.

Список источников

1. The state of world fisheries and aquaculture 2022: Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Towards Blue Transformation, Rome, 2022. URL: https://www.fao.org/3/cc0461ru/online/sofia/2022/capture-fisheries-production.html (accessed: 20.01.2023).

2. Enyindah C., Etuk M., Anwuri P.A. The role of technology on aquaculture // Academia Letters. 2021. No. 2304. https://doi.org/10.20935/AL2304.

3. Ceccaldi H.J. Some possible ways forward development of aquaculture // Journal of Marine Biology and Aquaculture (JMBAC). 2016. Vol. 4(6). P. 1–12. DOI: 10.15406/jamb.2016.04.00104.

4. Frankic A.M., Hershner C. Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture // Aquaculture International. 2003. Vol. 11. P. 517–530.

5. Browdy C.L., Bratvold D., Stokes A.D., Mcintosh R.P. Perspectives on the application of closed shrimp culture systems // Jory E.D., Browdy C.L. (eds) The new wave, proceedings of the special session on sustainable shrimp culture. Baton Rouge, USA: The World Aquaculture Society, 2001. P. 20–34.

6. De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N., Verstraete W. The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture // Aquaculture. 2008. Vol. 277. P. 125–137.

7. Bender J., Lee R., Sheppard M., Brinkley K., Philips P., Yeboah Y., Wah R.C. A waste effluent treatment system based on microbial mats for black sea bass *Centropristis striata* recycled water mariculture // Aquacultural Engineering. 2004. No. 31. P. 73–82.

8. Pinho S., Leal M.M., Shaw C., Baganz D., Baganz G., Staaks G. et al. Insect-based fish feed in decoupled aquaponic systems: Effect on lettuce production and resource use // PLoS ONE. 2024. Vol. 19(1). e0295811. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295811.

9. Черданцев В.П. Экономическая целесообразность использования насекомых на корма при разведении объектов аквакультуры // Московский экономический журнал. 2023. Т. 8, № 3. DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_3_108.

10. Daniel N. A review on replacing fish meal in aqua feeds using plant protein sources // International Journal of Fisheries and Aquatic Studies. 2018. Vol. 6(2). P. 164–179. URL: https://www.fisheriesjournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartC/6-1-35-823.pdf (accessed: 22.12.2023).

11. Кучихин Ю.А. Перспектива и возможности применения белого люпина (*lupinus albus*) в кормах аквакультуры для донных видов рыб // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2022. № 4. С. 225–230. DOI: 10.24412/2311-6447-2022-4-225-230.

12. Hoang M.N., Nguyen P.N., Bossier P. Water quality, animal performance, nutrient budgets and microbial community in the biofloc-based polyculture system of white shrimp, *Litopenaeus vannamei* and gray mullet, *Mugil cephalus* // Aquaculture. 2020. Vol. 515. 734610.

13. Bouwmeester M.M., Goedknegt M.A., Poulin R., Thieltges D.W. Collateral diseases: Aquaculture impacts on wildlife infections // Journal of Applied Ecology. 2020. Vol. 58(3). P. 453–464. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13775.

14. Ahmed N., Thompson S., Glaser M. Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 63. P. 159–172.

15. Emerenciano M., Cuzon G., Goguenheim J., Gaxiola G. Floc contribution on spawning performance of blue shrimp Litopenaeus stylirostris // Aquaculture Research. Vol. 44(1). P. 75–85. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2011.03012.x.

16. Avnimelech Y. Biofloc Technology – A practical guide book. Baton Rouge: The World Aquaculture Society, 2009. 182 p.

17. Seymour J.R., Amin S.A., Raina J.B., Stocker R. Zooming in on the phycosphere: the ecological interface for phytoplankton-bacteria relationships // Nature Microbiology. 2017. Vol. 2, No. 17065. doi: 10.1038/nmicrobiol.2017.65.

18. Semwal A., Kumar A., Upreti U., Pathak Y. Biofloc technology: An emerging avenue in aquaculture // Agri-India Today. 2021. Vol. 1(4). P. 19–23. URL: https://www.researchgate.net/publication/354380499_biofloc_technology_an_emerging_avenue_in_aquaculture (accessed: 10.01.2023).

19. Kim J.H., Sohn S., Kim, S.K., Kim S.R., Kim S.K., Kim S.M., Kim N.Y., Hur Y.B. Effects on the survival rates, hematological parameters, and neurotransmitters in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, reared in bio-floc and seawater by *Streptococcus iniae* challenge // Fish Shellfish Immunology. 2021. Vol. 113. P. 79–85.

20. Григорьева Н.И., Журавель Е.В., Мазур А.А. Сезонные изменения качества воды в заливе Восток (залив Петра Великого, Японское море) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47, № 2. С. 162–169. DOI: 10.31857/S0321059620020066; EDN: GUQNRI.

21. Коренева Т.Г., Латковская Е.М., Частиков В.Н. Сезонная динамика гидрологогидрохимических характеристик и концентрации хлорофилла *a* в зал. Анива в 2003 г. // Вода: химия и экология. 2014. № 4(70). С. 33–45. EDN: SCKVRV.

22. Hargreaves J.A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds // Aquaculture. 1998. Vol. 166, No. 3–4. P. 181–212.

23. Folke C., Kautsky N. The role of ecosystems for a sustainable development of aquaculture // Ambio. 1989. No. 18. P. 234–243.

24. Yogev U., Sowers K.R., Mozes N., Gross A. N and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system // Aquaculture. 2017. Vol. 467. P. 118–126.

25. Avnimelech Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems // Aquaculture. 1999. Vol. 176, No. 3–4. P. 227–235.

26. Semwal A., Kumar A., Upreti U., Pathak Y. Recirculatory Aquaculture System (RAS) // Agri-India Today. 2021. Vol. 1(5), 0521. URL: https://www.researchgate.net/publication/354380932_recirculatory_aquaculture_system_ras?_tp=eyjjb250zxh0ijp7imzpcnn0ugfnzsi6inbyb2zpbguilcjwywdlijoichjvzmlszsj9fq (accessed: 10.01.2023).

27. Hargreaves J.A. Biofloc production systems for aquaculture // Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication. 2013. No. 4503. 11 p.

28. Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems // Aquaculture. 2006. Vol. 257, No. 1–4. P. 346–358. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019.

29. Li L., Tan L., Yang W., Xu X., Shen Y., Li J. Conjoint applications of meta-analysis and bioinformatic data toward understanding the effect of nitrate on fish // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 794, 148645. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148645; https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721037177?via%3Dihub (accessed: 10.01.2023).

30. Koltai T., Hancz C., Magyary I., Horn P. () Studies on the effect of nitrate selective resin on the water quality and growth rate of common carp (*Cyprinus carpio* L.) reared in recirculating system // Acta Agraria Kaposváriensis. 2002. Vol. 6(2). P. 277–283.

31. Monsees H., Klatt L., Kloas W., Wuertz S. Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems // Aquaculture Research. 2016. Vol. 48(7). P. 3482–3492.

32. Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W., Summerfelt S.T., Vinci B.J. Recirculating Aquaculture Systems. 2nd ed. New York: Cayuga Aqua Ventures, 2002. 769 p.

33. McCarthy J.J. The kinetics of nutrient utilization // Physiological bases of phytoplankton ecology // Bulletin – Fisheries Research Board of Canada. 1981. Vol. 210. P. 211–233.

34. Cheng P., Shan S., Zhu Z., Liu K., Namsaraev Z., Dubovskiy I., Xu Q. The role of microalgae culture modes in aquaculture: a brief opinion // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2023. Vol. 11, 1196948. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1196948.

35. Sicuro B. World aquaculture diversity: Origins and perspectives // Reviews in Aquaculture. 2021. Vol. 133. P. 1619–1634. DOI: 10.1111/raq.12537.

36. Pribyl P., Cepak V. Screening for heterotrophy in microalgae of various taxonomic positions and potential of mixotrophy for production of high-value compounds // Journal of Applied Phycology. 2019. Vol. 313. P. 1555–1564. https://doi.org/10.1007/s10811-019-1738-9.

37. Fan J., Huang J., Li Y., Han F., Wang J., Li X. et al. Sequential heterotrophy-dilution-photoinduction cultivation for efficient microalgal biomass and lipid production // Bioresource Technology. 2012. Vol. 112. P. 206–211. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.046.

38. Pinho S.M., Flores R.M.V., David L.H., Emerenciano M.G., Quagrainie K.K., Portella M.C. Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems // Aquaculture. 2022. Vol. 552, 737987.

39. Yu Y.-B., Choi J.-H., Lee J.-H., Jo A.-H., Han S.W., Han S.-H., Choi H.J., Choi C.Y., Kang J.-C., Min E. et al. Biofloc application using aquaponics and vertical aquaculture technology in aquaculture: Review // Fishes. 2023. Vol. 8(11). P. 543. https://doi.org/10.3390/fishes8110543.

40. Hargreaves J.A. Biofloc production systems for aquaculture // Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication. 2013. No. 4503. 11 p.

41. Han P., Lu Qian, Fan L., Zhou W. A review on the use of microalgae for sustainable aquaculture // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, 2377. DOI: 10.3390/app9112377.

42. De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N., Verstraete W. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture // Aquaculture. 2008. Vol. 277. P. 125–137.

43. Ogello E.O., Outa N.O., Obiero K.O., Kyule D.N., Munguti J.M. The prospects of biofloc technology (BFT) for sustainable aquaculture development // Scientific African. 2021. Vol. 14(1). e01053. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01053.

44. Yu Y.-B., Choi J.-H., Lee J.-H., Jo A.-H., Lee K.M., Kim J.-H. Biofloc technology in fish aquaculture: A review // Antioxidants. 2023. Vol. 12(2), 398. https://doi.org/10.3390/antiox12020398.

45. Emerenciano M., Gaxiola G., Cuzon G. Biofloc Technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. London: InTech, 2013. http://dx.doi.org/10.5772/53902.

46. Luo G., Gao Q., Wang C., Liu W., Sun D., Li L. et al. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system // Aquaculture. 2014. Vol. 422. P. 1–7.

47. Lakra W.S., Goswami M., Trudeau V.L. (Eds) Frontiers in aquaculture biotechnology. Elsevier, Academic Press, 2022. 298 p.

48. Nurhatijah N., Muchlisin Z.A., Sarong M.A., Supriatna A. Application of biofloc to maintain the water quality in culture system of the tiger prawn (*Penaeus monodon*) // AACL Bioflux. 2016. Vol. 9, No. 4. URL: http://www.bioflux.com.ro/aacl.

49. McCusker S., Warberg M.B., Davies S.J., Valente C.D.S., Johnson M.P., Cooney R. et al. Biofloc technology as part of a sustainable aquaculture system: A review on the status and innovations for its expansion // Aquaculture, Fish and Fisheries. 2023. Vol. 3. P. 331–352. https://doi.org/10.1002/aff2.108.

50. Martinez-Porchas M., Ezquerra-Brauer M., Mendoza-Cano F., Chan-Higuera J.E., Vargas-Albores F., Martinez-Cordova L.R. Effect of supplementing heterotrophic and photoautotrophic biofloc, on the production response, physiological condition and post-harvest quality of the white leg shrimp, *Litopenaeus vannamei* // Aquaculture Reports 2020. Vol. 16, 100257. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100257.

51. Xu W.J., Morris T.C., Samocha T.M. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system // Aquaculture. 2016. Vol. 453. P. 169–175.

52. Ткачева И.В., Поляхов В.С. Способ водоподготовки для запуска биофлоковой системы на основе пробиотиков с разными композициями // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2019. № 11(166). С. 60–65.

53. Castro-Nieto L.M., Castro-Barrera T., De Lara-Andrade R., Castro-Mejía J., Castro-Mejía G. Biofloc systems: a technological breakthrough in aquaculture // Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente. 2012. Vol. 1(1). P. 1–5.

54. Crab R., Kochva M., Verstraete W., Avnimelech Y. Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia // Aquaculture Engineering. 2009. Vol. 40. P. 105–112.

55. Khanjani M.H., Sharifinia M., Emerenciano M.G.C. Biofloc technology (BFT) in aquaculture: What goes right, what goes wrong? A scientific-based snapshot // Aquaculture Nutrition. 2024. Vol. 2024, No. 7496572. 24 p. https://doi.org/10.1155/2024/7496572.

56. Samocha T.M. Sustainable biofloc system for marine shrimp. Elsevier, Academic Press, 2019. https://doi.org/10.1016/C2018-0-02628-6.

57. Harun A.A.C., Mohammad N.A.H., Ikhwanuddin M., Jauhari I., Sohaili J., Kasan N.A. Effect of different aeration units, N types and inoculum on biofloc formation for improvement of Pacific whiteleg shrimp production // The Egyptian Journal of Aquatic Research. 2019. Vol. 45. P. 287–292. https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.07.001.

58. Gaona C.A.P., de Almeida M.S., Viau V., Poersch L.H., Wasielesky W.J. Effect of different total suspended solids levels on a *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) BFT culture system during biofloc formation // Aquaculture Research. 2015. Vol. 48(3). P. 1070–1079. https://doi.org/10.1111/are.12949.

59. Emerenciano M., Martinez-Cordova L.R., Martinez-Porchas M., Miranda-Baeza A. Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture // Tutu H. (ed.) Water Quality. London: Intech, 2017. P. 91–109. https://doi.org/10.5772/66416.

60. Ogunkalu O.A. Application of biofilms in aquaculture systems // Academia Letters. 2021. Article No. 2002. https://doi.org/10.20935/AL2002.

61. Suryakumar B., Avnimelech Y. Adapting biofloc technology for use in small scale ponds with vertical substrate // World Aquaculture. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/320181276_Adapting_Biofloc_Technology_for_Use_in_Small_Scale_Ponds_with_Vertical_Substrate (accessed: 13.02.2024).

62. Negri M., Romera D.M., Garcia F. Integrated multitrophic aquaculture in ponds using substrate for periphyton as natural source of food // Boletin do Instituto de Pesca. 2023. Vol. 49, No. e783. https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2023.49.e783.

References

1. The state of world fisheries and aquaculture 2022: Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Towards Blue Transformation, Rome, 2022. URL: https://www.fao.org/3/cc0461ru/online/sofia/2022/capture-fisheries-production.html (accessed: 20.01.2023).

2. Enyindah C., Etuk M., Anwuri P.A. The role of technology on aquaculture // Academia Letters. 2021. No. 2304. https://doi.org/10.20935/AL2304.

3. Ceccaldi H.J. Some possible ways forward development of aquaculture // Journal of Marine Biology and Aquaculture (JMBAC). 2016. Vol. 4(6). P. 1–12. DOI: 10.15406/jamb.2016.04.00104.

4. Frankic A.M., Hershner C. Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture // Aquaculture International. 2003. Vol. 11. P. 517–530.

5. Browdy C.L., Bratvold D., Stokes A.D., Mcintosh R.P. Perspectives on the application of closed shrimp culture systems // Jory E.D., Browdy C.L. (eds) The new wave, proceedings of the special session on sustainable shrimp culture. Baton Rouge, USA: The World Aquaculture Society, 2001. P. 20–34.

6. De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N., Verstraete W. The basics of bio-flocs technology: the added value for aquaculture // Aquaculture. 2008. Vol. 277. P. 125–137.

7. Bender J., Lee R., Sheppard M., Brinkley K., Philips P., Yeboah Y., Wah R.C. A waste effluent treatment system based on microbial mats for black sea bass *Centropristis striata* recycled water mariculture // Aquacultural Engineering. 2004. No. 31. P. 73–82.

8. Pinho S., Leal M.M., Shaw C., Baganz D., Baganz G., Staaks G. et al. Insect-based fish feed in decoupled aquaponic systems: Effect on lettuce production and resource use // PLoS ONE. 2024. Vol. 19(1). e0295811. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295811.

9. Cherdantsev V.P. Ekonomicheskaya tselesoobraznost' ispol'zovaniya nasekomykh na korma pri razvedenii ob"ektov akvakul'tury // Moskovskiy ekonomicheskiy zhurnal. 2023. Vol. 8, No. 3. (In Russ.). DOI: 10.55186/2413046X_2023_8_3_108.

10. Daniel N. A review on replacing fish meal in aqua feeds using plant protein sources // International Journal of Fisheries and Aquatic Studies. 2018. Vol. 6(2). P. 164–179. URL: https://www.fisheriesjournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartC/6-1-35-823.pdf (accessed: 22.12.2023).

11. Kuchikhin Yu.A. Perspektiva i vozmozhnosti primeneniya belogo lyupina (lupinus albus) v kormakh akvakul'tury dlya donnykh vidov ryb // Tekhnologii pishchevoy i pererabatyvayushchey promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya. 2022. No. 4. P. 225–230. (In Russ.). DOI: 10.24412/2311-6447-2022-4-225-230.

12. Hoang M.N., Nguyen P.N., Bossier P. Water quality, animal performance, nutrient budgets and microbial community in the biofloc-based polyculture system of white shrimp, *Litopenaeus vannamei* and gray mullet, *Mugil cephalus* // Aquaculture. 2020. Vol. 515. 734610.

13. Bouwmeester M.M., Goedknegt M.A., Poulin R., Thieltges D.W. Collateral diseases: Aquaculture impacts on wildlife infections // Journal of Applied Ecology. 2020. Vol. 58(3). P. 453–464. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13775.

14. Ahmed N., Thompson S., Glaser M. Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability // Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 63. P. 159–172.

15. Emerenciano M., Cuzon G., Goguenheim J., Gaxiola G. Floc contribution on spawning performance of blue shrimp Litopenaeus stylirostris // Aquaculture Research. Vol. 44(1). P. 75–85. DOI: 10.1111/j.1365-2109.2011.03012.x.

16. Avnimelech Y. Biofloc Technology – A practical guide book. Baton Rouge: The World Aquaculture Society, 2009. 182 p.

17. Seymour J.R., Amin S.A., Raina J.B., Stocker R. Zooming in on the phycosphere: the ecological interface for phytoplankton-bacteria relationships // Nature Microbiology. 2017. Vol. 2, No. 17065. doi: 10.1038/nmicrobiol.2017.65.

18. Semwal A., Kumar A., Upreti U., Pathak Y. Biofloc technology: An emerging avenue in aquaculture // Agri-India Today. 2021. Vol. 1(4). P. 19–23. URL: https://www.researchgate.net/publication/354380499_biofloc_technology_an_emerging_avenue_in_aquaculture (accessed: 10.01.2023).

19. Kim J.H., Sohn S., Kim, S.K., Kim S.R., Kim S.K., Kim S.M., Kim N.Y., Hur Y.B. Effects on the survival rates, hematological parameters, and neurotransmitters in olive flounders, *Paralichthys olivaceus*, reared in bio-floc and seawater by *Streptococcus iniae* challenge // Fish Shellfish Immunology. 2021. Vol. 113. P. 79–85.

20. Grigorieva N.I., Zhuravel E.V., Mazur A.A. Seasonal changes in water quality in Vostok bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan) // Vodnye Resursy. 2020. Vol. 47, No. 2. P. 162–169. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0321059620020066; EDN: GUQNRI.

21. Koreneva T.G., Latkovskaya E.M., Chastikov V.N. Sezonnaya dinamika gidrologo-gidrokhimicheskikh kharakteristik i kontsentratsii khlorofilla *a* v zal. Aniva v 2003 g. // Voda: khimiya i ekologiya. 2014. No. 4(70). P. 33–45. (In Russ.). EDN: SCKVRV.

22. Hargreaves J.A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds // Aquaculture. 1998. Vol. 166, No. 3–4. P. 181–212.

23. Folke C., Kautsky N. The role of ecosystems for a sustainable development of aquaculture // Ambio. 1989. No. 18. P. 234–243.

24. Yogev U., Sowers K.R., Mozes N., Gross A. N and carbon balance in a novel near-zero water exchange saline recirculating aquaculture system // Aquaculture. 2017. Vol. 467. P. 118–126.

25. Avnimelech Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems // Aquaculture. 1999. Vol. 176, No. 3–4. P. 227–235.

26. Semwal A., Kumar A., Upreti U., Pathak Y. Recirculatory Aquaculture System (RAS) // Agri-India Today. 2021. Vol. 1(5), 0521. URL: https://www.researchgate.net/publication/354380932_recirculatory_aquaculture_system_ras?_tp=eyjjb250zxh0ijp7imzpcnn0ugfnzsi6inbyb2zpbguilcjwywdlijoichjvzmlszsj9fq (accessed: 10.01.2023).

27. Hargreaves J.A. Biofloc production systems for aquaculture // Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication. 2013. No. 4503. 11 p.

28. Ebeling J.M., Timmons M.B., Bisogni J.J. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia–nitrogen in aquaculture systems // Aquaculture. 2006. Vol. 257, No. 1–4. P. 346–358. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.03.019.

29. Li L., Tan L., Yang W., Xu X., Shen Y., Li J. Conjoint applications of meta-analysis and bioinformatic data toward understanding the effect of nitrate on fish // Science of the Total Environment. 2021. Vol. 794, 148645. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148645; https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721037177?via%3Dihub (accessed: 10.01.2023).

30. Koltai T., Hancz C., Magyary I., Horn P. () Studies on the effect of nitrate selective resin on the water quality and growth rate of common carp (*Cyprinus carpio* L.) reared in recirculating system // Acta Agraria Kaposváriensis. 2002. Vol. 6(2). P. 277–283.

31. Monsees H., Klatt L., Kloas W., Wuertz S. Chronic exposure to nitrate significantly reduces growth and affects the health status of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) in recirculating aquaculture systems // Aquaculture Research. 2016. Vol. 48(7). P. 3482–3492.

32. Timmons M.B., Ebeling J.M., Wheaton F.W., Summerfelt S.T., Vinci B.J. Recirculating Aquaculture Systems. 2nd ed. New York: Cayuga Aqua Ventures, 2002. 769 p.

33. McCarthy J.J. The kinetics of nutrient utilization // Physiological bases of phytoplankton ecology // Bulletin – Fisheries Research Board of Canada. 1981. Vol. 210. P. 211–233.

34. Cheng P., Shan S., Zhu Z., Liu K., Namsaraev Z., Dubovskiy I., Xu Q. The role of microalgae culture modes in aquaculture: a brief opinion // Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. 2023. Vol. 11, 1196948. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1196948.

35. Sicuro B. World aquaculture diversity: Origins and perspectives // Reviews in Aquaculture. 2021. Vol. 133. P. 1619–1634. DOI: 10.1111/raq.12537.

36. Pribyl P., Cepak V. Screening for heterotrophy in microalgae of various taxonomic positions and potential of mixotrophy for production of high-value compounds // Journal of Applied Phycology. 2019. Vol. 313. P. 1555–1564. https://doi.org/10.1007/s10811-019-1738-9.

37. Fan J., Huang J., Li Y., Han F., Wang J., Li X. et al. Sequential heterotrophy-dilution-photoinduction cultivation for efficient microalgal biomass and lipid production // Bioresource Technology. 2012. Vol. 112. P. 206–211. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.046.

38. Pinho S.M., Flores R.M.V., David L.H., Emerenciano M.G., Quagrainie K.K., Portella M.C. Economic comparison between conventional aquaponics and FLOCponics systems // Aquaculture. 2022. Vol. 552, 737987.

39. Yu Y.-B., Choi J.-H., Lee J.-H., Jo A.-H., Han S.W., Han S.-H., Choi H.J., Choi C.Y., Kang J.-C., Min E. et al. Biofloc application using aquaponics and vertical aquaculture technology in aquaculture: Review // Fishes. 2023. Vol. 8(11). P. 543. https://doi.org/10.3390/fishes8110543.

40. Hargreaves J.A. Biofloc production systems for aquaculture // Southern Regional Aquaculture Center (SRAC) Publication. 2013. No. 4503. 11 p.

41. Han P., Lu Qian, Fan L., Zhou W. A review on the use of microalgae for sustainable aquaculture // Applied Sciences. 2019. Vol. 9, 2377. DOI: 10.3390/app9112377.

42. De Schryver P., Crab R., Defoirdt T., Boon N., Verstraete W. The basics of bio-flocs technology: The added value for aquaculture // Aquaculture. 2008. Vol. 277. P. 125–137.

43. Ogello E.O., Outa N.O., Obiero K.O., Kyule D.N., Munguti J.M. The prospects of biofloc technology (BFT) for sustainable aquaculture development // Scientific African. 2021. Vol. 14(1). e01053. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01053.

44. Yu Y.-B., Choi J.-H., Lee J.-H., Jo A.-H., Lee K.M., Kim J.-H. Biofloc technology in fish aquaculture: A review // Antioxidants. 2023. Vol. 12(2), 398. https://doi.org/10.3390/antiox12020398.

45. Emerenciano M., Gaxiola G., Cuzon G. Biofloc Technology (BFT): A review for aquaculture application and animal food industry. London: InTech, 2013. http://dx.doi.org/10.5772/53902.

46. Luo G., Gao Q., Wang C., Liu W., Sun D., Li L. et al. Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system // Aquaculture. 2014. Vol. 422. P. 1–7.

47. Lakra W.S., Goswami M., Trudeau V.L. (Eds) Frontiers in aquaculture biotechnology. Elsevier, Academic Press, 2022. 298 p.

48. Nurhatijah N., Muchlisin Z.A., Sarong M.A., Supriatna A. Application of biofloc to maintain the water quality in culture system of the tiger prawn (*Penaeus monodon*) // AACL Bioflux. 2016. Vol. 9, No. 4. URL: http://www.bioflux.com.ro/aacl.

49. McCusker S., Warberg M.B., Davies S.J., Valente C.D.S., Johnson M.P., Cooney R. et al. Biofloc technology as part of a sustainable aquaculture system: A review on the status and innovations for its expansion // Aquaculture, Fish and Fisheries. 2023. Vol. 3. P. 331–352. https://doi.org/10.1002/aff2.108.

50. Martinez-Porchas M., Ezquerra-Brauer M., Mendoza-Cano F., Chan-Higuera J.E., Vargas-Albores F., Martinez-Cordova L.R. Effect of supplementing heterotrophic and photoautotrophic biofloc, on the production response, physiological condition and post-harvest quality of the white leg shrimp, *Litopenaeus vannamei* // Aquaculture Reports 2020. Vol. 16, 100257. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100257.

51. Xu W.J., Morris T.C., Samocha T.M. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system // Aquaculture. 2016. Vol. 453. P. 169–175.

52. Tkacheva I.V., Polyakhov V.S. Sposob vodopodgotovki dlya zapuska bioflokovoi sistemy na osnove probiotikov s raznymi kompozitsiyami // Rybovodstvo i rybnoe khozyaistvo. 2019. No. 11(166). P. 60–65.

53. Castro-Nieto L.M., Castro-Barrera T., De Lara-Andrade R., Castro-Mejía J., Castro-Mejía G. Biofloc systems: a technological breakthrough in aquaculture // Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente. 2012. Vol. 1(1). P. 1–5.

54. Crab R., Kochva M., Verstraete W., Avnimelech Y. Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia // Aquaculture Engineering. 2009. Vol. 40. P. 105–112.

55. Khanjani M.H., Sharifinia M., Emerenciano M.G.C. Biofloc technology (BFT) in aquaculture: What goes right, what goes wrong? A scientific-based snapshot // Aquaculture Nutrition. 2024. Vol. 2024, No. 7496572. 24 p. https://doi.org/10.1155/2024/7496572.

56. Samocha T.M. Sustainable biofloc system for marine shrimp. Elsevier, Academic Press, 2019. https://doi.org/10.1016/C2018-0-02628-6.

57. Harun A.A.C., Mohammad N.A.H., Ikhwanuddin M., Jauhari I., Sohaili J., Kasan N.A. Effect of different aeration units, N types and inoculum on biofloc formation for improvement of Pacific whiteleg shrimp production // The Egyptian Journal of Aquatic Research. 2019. Vol. 45. P. 287–292. https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.07.001.

58. Gaona C.A.P., de Almeida M.S., Viau V., Poersch L.H., Wasielesky W.J. Effect of different total suspended solids levels on a *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) BFT culture system during biofloc formation // Aquaculture Research. 2015. Vol. 48(3). P. 1070–1079. https://doi.org/10.1111/are.12949.

59. Emerenciano M., Martinez-Cordova L.R., Martinez-Porchas M., Miranda-Baeza A. Biofloc technology (BFT): a tool for water quality management in aquaculture // Tutu H. (ed.) Water Quality. London: Intech, 2017. P. 91–109. https://doi.org/10.5772/66416.

60. Ogunkalu O.A. Application of biofilms in aquaculture systems // Academia Letters. 2021. Article No. 2002. https://doi.org/10.20935/AL2002.

61. Suryakumar B., Avnimelech Y. Adapting biofloc technology for use in small scale ponds with vertical substrate // World Aquaculture. 2017. URL: https://www.researchgate.net/publication/320181276_Adapting_Biofloc_Technology_for_Use_in_Small_Scale_Ponds_with_Vertical_Substrate (accessed: 13.02.2024).

62. Negri M., Romera D.M., Garcia F. Integrated multitrophic aquaculture in ponds using substrate for periphyton as natural source of food // Boletin do Instituto de Pesca. 2023. Vol. 49, No. e783. https://doi.org/10.20950/1678-2305/bip.2023.49.e783.

Информация об авторах

С.А. Низяев – кандидат биологических наук, ведущий инженер лаборатории химико-биологических исследований, SPIN-код: 8837-2677, AuthorID: 395356, ResearcherID: AAX-8701-2021;

Е.М. Латковская – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии, биологии и природных ресурсов, зав. лабораторией химико-биологических исследований, SPIN-код: 9855-3629, AuthorID: 152625, Scopus Author ID: 26027600100, ResearcherID: AAX-1484-2021;

Ю.А. Ревин – координатор проектов по марикультуре, Ассоциация социальных предпринимателей Сахалинской области.

Information about the authors

S.A. Nizyaev – PhD in Biology Sciences, Leading Engineering of the Laboratory of chemical and biological research, SPIN-code: 8837-2677, AuthorID: 395356, ResearcherID: AAX-8701-2021;

E.M. Latkovskaya – PhD in Biology Sciences, Associate Professor of the Department, Head of the Laboratory of chemical and biological research, SPIN-code: 9855-3629, AuthorID: 152625, Scopus Author ID: 26027600100, ResearcherID: AAX-1484-2021;

Y.A. Revin – Coordinator of mariculture projects, Association of Social Entrepreneurs of the Sakhalin Region.

Статья поступила в редакцию 28.02.2024; одобрена после рецензирования 01.03.2024; принята к публикации 20.03.2024.

The article was submitted 28.02.2024; approved after reviewing 01.03.2024; accepted for publication 20.03.2024.