

человека к 2030 году достигнет 21,2 кг, увеличившись с 20,5 кг в 2020 году. Такой рост потребления рыбной продукции связан с совокупностью факторов, включая повышение доходов населения, урбанизацию, увеличение объёмов производства рыбы и улучшение логистических цепочек. По прогнозам, данная тенденция сохранится, что приведёт к дальнейшему росту потребления рыбы в ближайшие десятилетия (Campanati et al., 2022).

Рост объёмов производства рыбы, как правило, сопровождается увеличением затрат, особенно на корма, в расчёте на единицу площади водоёма (Henriksson et al., 2018). Плотность посадки рыбы напрямую влияет на суточный объём потребляемых кормов; чем выше плотность выращивания гидробионтов, тем больше образуется отходов (Dauda et al., 2019). Высокая концентрация питательных веществ в отходах, наряду с загрязняющими веществами от других видов хозяйственной деятельности, усиливает нагрузку на водные экосистемы, главным образом в городских районах, расположенных вблизи побережий, это приводит к эвтрофикации прибрежных вод и создаёт серьёзную угрозу для устойчивости морских и прибрежных экосистем, а также оказывает прямое негативное воздействие на здоровье людей, а также на экономическую сферу, воздействуя на туризм и аквакультуру (Desbonnet, Costa-Pierce, 2005).

Достижение высокой продуктивности и поддержание качества продукции в аквакультуре невозможно без эффективного контроля за состоянием воды. Ухудшение её параметров отрицательно влияет на рост рыбы и снижает устойчивость к заболеваниям. Несоответствие воды оптимальным показателям может вызвать у гидробионтов физиологический стресс, замедление развития, а также повысить их восприимчивость к болезням, что в итоге приводит к значительным потерям продукции (Mac Intyre et al., 2008). Нерациональное управление водными ресурсами может спровоцировать дефицит кислорода, эвтрофикацию водоёмов, распространение патогенных микроорганизмов, а также повышение концентрации токсичных нитритов и аммиака (Hoang et al., 2020).

Сточные воды аквакультурных хозяйств содержат разные загрязнители, включая твёрдые частицы (фекалии, остатки корма) и избыточные элементы биогенного происхождения, которые при отсутствии контроля способны снижать продуктивность. Эти вещества образуются вследствие перекармливания, выделения продуктов жизнедеятельности и метаболических процессов, в том числе образования аммиака (Maillard et al., 2005).

Предпосылки создания сбалансированных экосистем на основе концепции интегрированной аквакультуры.

Для устойчивого развития аквакультуры необходимы продуманные стратегии управления водной средой (Lin et al., 2010). В настоящее время применяются различные традиционные методы контроля качества воды, такие как частичная замена воды, аэрация, механическая фильтрация и химическая обработка, однако эти способы часто требуют значительных затрат и могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду (Ganeshan, Jha, 2025). В последние годы всё большую популярность приобретают методы биоремедиации, которые отличаются высокой эффективностью и экологической безопасностью. Такие доступные и экономичные технологии способствуют устойчивому развитию аквакультуры (Manikanta et al., 2024; Wan Mahari, 2024; Soaudy, Ghonimy, 2025).

Повышенное содержание азотсодержащих соединений в воде отрицательно сказывается на эффективности кормления и замедляет рост гидробионтов. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка методов дополнительной биологической фильтрации, которые позволяют снизить концентрацию азотистых веществ, увеличить плотность посадки, ускорить прирост массы и оптимизировать расход кормов. Отходы аквакультуры состоят преимущественно из метаболических выделений рыбы и

разложившихся остатков корма, основными компонентами которых являются соединения азота (N) и фосфора (P). Эти компоненты критически важны для белкового синтеза в растениях, но их повышенная концентрация в воде может приводить к загрязнению окружающей среды (Юрина и др., 2020).

Образование питательных веществ в отходах происходит в результате микробного разложения белков, углеводов и липидов, а также в процессе метаболизма гидробионтов. Среди них биогенные элементы N и P содержатся в форме аммонийного азота, нитритов, нитратов и фосфатов. Количество этих биогенных веществ в воде варьирует в зависимости от состава кормов, видовых особенностей и биомассы рыбы, а также методов ведения хозяйства (Novgiadi et al., 2020). Одним из процессов переработки таких отходов является биоконверсия. Этот процесс позволяет трансформировать органические отходы аквакультуры в полезные продукты, включая энергию. Отходы успешно применяются в качестве питательных субстратов для культивирования шелкопряда (*Bombyx mori*), дафний (*Daphnia magna*) и некоторых видов растений (Xu et al., 2022; Ayilaga, Babalola, 2023).

Включение дополнительных организмов в производственный цикл, помимо основного объекта выращивания, составляет суть концепции интегрированной аквакультуры. В рамках этой системы отходы превращаются в ценные ресурсы благодаря высокому содержанию питательных веществ. Такой подход способствует повышению производственной эффективности, улучшению экономических показателей и минимизации экологического ущерба (Alameen et al., 2023).

Интегрированная аквакультура представляет собой сбалансированную экосистему устойчивого производства пищевой продукции. Её основой является принцип циклического использования отходов: продукты жизнедеятельности одной биологической системы служат питательной базой для другой (Yadav et al., 2023).

Поликультура в классическом понимании предполагает совместное выращивание нескольких видов водных организмов в общих или связанных между собой ёмкостях. Такой подход оптимизирует использование ресурсов за счёт переработки органических отходов добавочными объектами. Среди преимуществ поликультуры можно отметить увеличение объёмов производства рыбы без расширения используемых площадей, а также повышение экологической и экономической устойчивости хозяйства. Эффективное управление поликультурой требует тщательного подбора видового состава, контроля плотности посадки и поддержания оптимальных условий среды. Это позволяет максимизировать продуктивность при сохранении экологического баланса. Поликультура представляет собой устойчивый метод рыбоводства, способный значительно повысить объёмы производства и экономическую эффективность при условии грамотного научного подхода и стратегического планирования (Amoussou et al., 2022; Sa'adah et al., 2024; Pant, Kumar, 2025).

Использование пресноводных микроводорослей для очистки сточных вод.

Использование микроводорослей для водоочистки также является важным направлением в области биологической очистки сточных вод. Данный метод основан на способности микроорганизмов утилизировать органические соединения, присутствующие в сточных водах, используя их для собственного метаболизма. В ходе этого процесса происходит увеличение микробной биомассы (Гурбанова, 2024).

Однако в современных исследованиях основное внимание зачастую уделяется подбору высокопродуктивных видов водных организмов, тогда как влияние биоразнообразия на эффективность очистки воды и лежащие в основе этого механизмы остаются недостаточно изученными. В частности, в эксперименте (Zhou et al., 2023) использовались пять распространённых видов пресноводных микроводорослей для создания экспериментальных

микрососудов с различным видовым составом и уровнем биоразнообразия. Анализ с применением моделей со смешанными эффектами выявил положительную корреляцию между видовым разнообразием микроводорослей и эффективностью удаления азота из воды (Aketo et al., 2020).

Следует отметить, что, по данным некоторых исследований, технология очистки сточных вод с использованием водорослей демонстрирует ограниченную эффективность в отношении органических соединений, что обуславливает необходимость предварительной обработки сточных вод перед их подачей в систему с водорослями (Nguyen et al., 2022; Задубровская и др., 2023; Kurniawan et al., 2025).

Микроводоросли активно используют фосфор в качестве ключевого питательного элемента для своих физиологических функций. Хотя их метаболическая активность составляет основу этого процесса, эффективность удаления загрязнителей зависит от конкретных видов водорослей и характеристик сточных вод. Многочисленные исследования подтверждают эффективность микроводорослей в извлечении питательных веществ из эвтрофных водоемов, при этом технология предлагает дополнительные преимущества, включая фиксацию углерода и создание ценных биопродуктов (Pacheco et al., 2020). Добавление микроводорослей (*Chlorella sp.*) в рыбоводные водоёмы доказало свою эффективность в борьбе с эвтрофикацией водоёмов. Эксперименты показали, что введение микроводорослей в культивационную среду через 6 дней снижает содержание азотных соединений на 51-233 мг/л в зависимости от плотности посадки рыбы, при этом уровень аммиачного азота оставался в безопасных пределах 15,5 мг/л. Фотосинтетическая активность водорослей также приводит к повышению pH воды за счёт потребления бикарбонатов, а в системах рециркуляции (RAS) применение иммобилизованных микроводорослей *Scenedesmus sp.* и *Chlorella sp.* в форме альгината натрия обеспечивает удаление 43-45% органических загрязнений и фосфора, а также способствует детоксикации аммиака путём его преобразования в нитраты (Sankaran et al., 2010).

Максимальная эффективность удаления азота (86%) и фосфора (83%) достигается при использовании мембранных фотобиореакторов, при этом водоросли также эффективно устраняют антибиотики через процессы биосорбции и биоразложения (Gao et al., 2016; Hena et al., 2021).

Комбинированное использование водорослей и бактерий.

Взаимодействия водорослей и бактерий основаны на обмене питательными веществами. Бактерии поставляют CO₂ для водорослей, которые в свою очередь производят кислород и органические соединения, включая защитные внеклеточные полимеры (Lau, 2006). Нитрифицирующие бактерии преобразуют аммоний в нитраты, доступные для водорослей, тогда как гетеротрофные бактерии утилизируют органические выделения водорослей. Этот симбиоз регулируется сложной системой биохимических взаимодействий: водоросли выделяют метаболиты, влияющие на бактериальный метаболизм, а бактерии продуцируют как стимуляторы (сидерофоры), так и ингибиторы роста водорослей (Amin et al., 2009). Особое значение имеет их совместная роль в круговороте фосфора, где бактерии преобразуют органические фосфаты в минеральную форму, доступную для водорослей. Комбинированное использование водорослей и бактерий демонстрирует более высокую эффективность очистки по сравнению с раздельным применением, особенно в удалении азота и снижении токсичности аммиака. Ключевым аспектом этого симбиоза является газообмен: водоросли потребляют CO₂, выделяемый бактериями, а бактерии используют кислород фотосинтеза, создавая оптимальные условия для развития гидробионтов (Mishra et al., 2011).

Отходы рыбоводства могут служить ценным источником питательных веществ для культивируемых растений. Данный метод производства позволяет получать сельскохозяйственную продукцию с повышенным содержанием белка по сравнению с традиционными методами выращивания (Короченский и др., 2024).

Для полноценного использования данных питательных вещества, например, выращивают микрозелень в комбинированных системах рыбоводства, и данное направление получило активное развитие в мировой практике. Согласно результатам исследований (Письменная, 2024), совместное выращивание микрозелени с гидробионтами способствует снижению концентрации аммиачных и нитратных соединений по сравнению с системами рыбоводства без использования аквапонных технологий (Pappa, 2013; Indriani, Ulaan, 2024).

В условиях УЗВ, обогащенной питательными веществами, симбиотическое сообщество рыб, растений и бактерий способно обеспечивать более высокую продуктивность по сравнению с отдельным выращиванием гидробионтов и сельскохозяйственных культур. Разнообразие используемых рыб и растений достаточно широко и ограничивается преимущественно параметрами водной среды, на которые существенное влияние оказывают состав рыбных кормов, площадь растительных посадок и баланс компонентов системы, часто далёкий от оптимального. Наиболее распространенными видами рыб являются карпы, тиляпии и сомы, хотя практикуется и разведение более требовательных видов рыб, а также ракообразных (Palm et al., 2019; Stoyanova et al., 2024; Bhadra et al., 2025).

Несмотря на многочисленные преимущества аквапоники, такие как экономия водных ресурсов, снижение потребности в химических удобрениях и возможность одновременного производства рыбы и растительной продукции, данная система сталкивается со сложностями в согласовании требований рыб, растений и нитрифицирующих бактерий (Chhainon, Serey, 2024). В связи с этим особую важность приобретает тщательный подбор кормовых составов и оптимизация режимов кормления, поскольку как дефицит, так и избыток питательных веществ способны отрицательно повлиять на состояние гидробионтов и выращиваемых растений. Проведенные исследования (Emerenciano et al., 2025) показывают, что устойчивое функционирование системы требует точного баланса между количеством вносимого корма, плотностью посадки рыбы и способностью растений усваивать питательные вещества. Важно отметить, что при соблюдении оптимальных норм кормления отходы жизнедеятельности рыб стимулируют развитие растений, причём темпы их роста могут превышать показатели контрольных образцов, выращенных на гидропонике, хотя превышение этих норм приводит к угнетению растительных культур из-за чрезмерной нагрузки органическими отходами.

Совместное содержание рыб и ракообразных.

Помимо утилизации органических веществ с помощью добавления растений в цикл выращивания рыб, можно использовать и другие объекты аквакультуры для более полного использования имеющихся кормовых средств. Одним из перспективных направлений в аквакультуре является совместное содержание рыб и креветок (Ar et al., 2020; Deepti et al., 2024). Согласно данным ФАО (2020), выращивание ракообразных стало одним из наиболее динамично развивающихся направлений животноводства с ежегодным приростом 2,9% за последние два десятилетия. Первоначально этот рост обеспечивался за счет расширения площадей, но в последние годы акцент сместился на интенсификацию производства (Joffre et al., 2018; Emerencia no et al., 2022;).

Вместе с тем, исследования показывают, что далеко не все виды рыб подходят для такого совместного выращивания. Работы В.Ф. Кулеша свидетельствуют, что для поликультуры с пресноводными креветками пригодны исключительно растительноядные

виды рыб, тогда как карповые оказывают негативное влияние, сокращая популяцию креветок за счёт их поедания (Статкевич, 2017).

Исследования по совместному выращиванию осетровых рыб и креветок выявили отсутствие выраженных отношений "хищник-жертва" между молодью осетровых и креветками, что открывает перспективы для дальнейших исследований в этом направлении (Филиппова, 2004). При этом успешное товарное выращивание креветок требует поддержания оптимальной температуры воды и строгого контроля её качества

Объединение креветок (*Penaeus chinensis*), крабов (*Portunus trituberculatus*), двустворчатых моллюсков (*Sinonovacula constricta*) и рыб (*Cynoglossus semilaevis*) в интегрированную систему выращивания улучшило качество воды за счёт увеличения численности бактерий, которые в процессе фотосинтеза выделяют кислород в воду и улучшают нитрификацию (в основном окисление аммиака). В то же время, двустворчатые моллюски в этой системе могут увеличивать разнообразие и численность бактерий, контролируя уровень растворённого кислорода. Двустворчатые моллюски обладают более высокой эффективностью удаления взвешенных веществ из толщи воды (например, взвешенных частиц, рыбьего кала и мелких частиц корма) (Kong et al., 2023).

Системы биофлока и интегрированной мультитрофной аквакультуры.

Перспективным направлением является внедрение в систему УЗВ систему биофлока. Биофлок представляет собой эффективный метод биологической очистки воды в аквакультуре, получивший признание как "водная революция" в рыбоводстве. В основе данной системы лежит деятельность микроорганизмов, преимущественно бактерий и водорослей. Помимо них, биофлок содержит простейшие, диатомовые водоросли, грибы, нематоды, коловратки, а также органические частицы (фекалии, остатки корма), объединённые в рыхлую структуру бактериальной слизи за счёт электростатических сил (Hargreaves, 2006; Ahmad et al., 2017).

Между бактериями и водорослями наблюдается синергетический эффект: определенные бактериальные штаммы стимулируют рост микроводорослей, совместно улучшая качество воды. В процессе формирования биофлока первыми развиваются водоросли, затем доминирующее положение занимают гетеротрофные бактерии. Гетеротрофные бактерии превосходят денитрифицирующие по скорости усвоения неорганического азота, образуя в 10 раз больше биомассы. Эти универсальные микроорганизмы, распространённые в почве и воде, играют ключевую роль в переработке органики (Crab et al., 2012).

В системе биофлок аммиак удаляется тремя путями: фотоавтотрофным (водоросли), автотрофным бактериальным (нитрификация) и гетеротрофным (прямая ассимиляция в биомассу), причём нитрификация наиболее эффективна в долгосрочной перспективе (Ebeling et al., 2006).

Контроль взвешенных веществ достигается регулированием активности гетеротрофных и нитрифицирующих бактерий. Система эффективно снижает концентрацию азотистых веществ, уменьшает водопотребление и отходы, повышает эффективность кормления и усвоение протеина, улучшая качество воды в креветочных хозяйствах и при выращивании рыб. Исследования показывают, что креветки усваивают 18-29% азота из биофлока, а рыбы – около 25% (Bossier, Ekasari, 2017).

В рыбоводной практике также устойчиво закрепилось использование интегрированной мультитрофной аквакультуры, которая представляет собой перспективную систему рециркуляции питательных гидробионтов: водоросли эффективно удаляют азот, двустворчатые моллюски – веществ с участием различных видов гидробионтов, растений и

бактерий. В данной системе существует несколько блоков, в которых находятся двустворчатые моллюски, водные и наземные растения, водоросли и разные виды рыб. Ее эффективность зависит от используемых организмов и правильного подбора взвешенные вещества, а растения – растворённую органику (Chow et al., 2001; Nederlof et al., 2022).

Также в эту систему можно включать блоки с креветками и крабами, это будет способствовать улучшению качества воды за счёт усиления нитрификации и бактериального разнообразия (Zamora, Jeffs, 2011).

Заключение

По мере роста объёмов производства, развитие аквакультуры, сталкивается с серьёзными экологическими проблемами, связанными с накоплением отходов. Однако эти отходы могут стать ценным ресурсом при использовании современных биотехнологий, таких как аквапоника и интегрированные системы. Биологические методы очистки, включая применение микроводорослей и бактерий, доказали свою эффективность в снижении концентрации азота и фосфатов, что способствует уменьшению эвтрофикации водоёмов.

Необходимым условием для успешного функционирования таких систем является строгое соблюдение баланса между количеством корма, плотностью посадки рыбы и способностью растений усваивать питательные вещества. Интегрированные системы, такие как мультитрофная аквакультура (ИМТА) и биофлок-технологии, демонстрируют высокую эффективность за счёт комбинированного выращивания различных видов гидробионтов, что улучшает качество воды и повышает общую продуктивность.

Переход к циркулярным методам ведения аквакультуры, основанным на биологических и технологических решениях, позволяет не только снизить экологическую нагрузку, и повысить экономическую эффективность производства. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию этих систем, особенно в условиях интенсивного рыбоводства и ограниченных ресурсов, чтобы обеспечить устойчивое развитие отрасли в долгосрочной перспективе.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 124020200032-4

Список литературы

1. Гурбанова Г.А., Джумадурдыева Г. Методика использования микроводорослей для очистки сточных вод промышленных предприятий. // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 2: Естественные науки. Медицина. 2024. № 1. С. 77-80.
2. Задубровская Т.А., Шуклина Л.В., Латыпова А.В. Фикоремедиация как новый способ очищения сточных вод текстильного производства. // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии. 2023. С. 203-206.
3. Короченский И., Пронина Г., Жигин А. Совместное выращивание рыбы и овощных культур в системе аквапоника с использованием плавающих грядок. // Проблемы рыбного хозяйства. 2024. Т. 25. № 3. С. 145-154.
4. Письменная О. К вопросу о целесообразности использования аквапоника как эффективного ресурса для производства аквакультуры и микрорастений. // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2024. № 4. С. 54-60.
5. Статкевич С.В. Биотехнические нормативы искусственного воспроизводства гигантской креветки *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) в условиях Крыма. // Материалы IX междунар. науч.-практ. конф.: «Современные рыбохозяйственные и экологические проблемы Азово-Черноморского региона». Керчь: ЮгНИРО, 2017. С. 163-167.

6. Филиппова И.Н. Экономическая эффективность выращивания гигантской пресноводной креветки в Астраханской области. // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2004. № 3. С. 68-71.
7. Юрина Н.А., Данилова А.А., Максим Е.А., Гнеуш А.Н., Горобец Д.В., Трохимчук Н.Н. Аквапоника как способ получения гидропонного корма. // Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. 2020. Т. 9, № 1. С. 121-124.
8. Ahmad I., Babitha Rani A.M., Verma A.K., Maqsood M. Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition. // Aquaculture International. 2017. Vol. 25. P. 1215-1226.
9. Aketo T., Hoshikawa Y., Nojima D., Yabu Y., Maeda Y., Yoshino T. et al. Selection and characterization of microalgae with potential for nutrient removal from municipal wastewater and simultaneous lipid production. // Journal of Bioscience and Bioengineering. 2020. Vol. 129. P. 565-572.
10. Alameen A.M., Devi K.N., Kumar S.D., Gunabal S., Krishnaveni N., Gowthami A. et al. A sustainable utilization of aquaculture wastewater for the production of commercially important tilapia fish and plants (mint and chickpea) in improved integrated aqua-agriculture system. // Bioresource Technology Reports. 2023. Vol. 21. P. 101313.
11. Amoussou N., Lecocq T., Fourier C., Nivelles R., Fleck C., Fontaine P., Thomas M. A multi-trait evaluation framework to assess the consequences of polyculture in fish production: An application for pikeperch in recirculated aquaculture systems. // Aquaculture Reports. 2022. Vol. 27. P. 101349.
12. Amin S.A., Green D.H., Hart M.C., Küpper F.C., Sunda W.G., Carrano C.J. Photolysis of iron-siderophore chelates promotes bacterial-algal mutualism. // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. Vol. 106. P. 17071-17076.
13. AL-Huqail A.A., Kumar P., Eid E.M. et al. Risk assessment of heavy metals contamination in soil and two rice (*Oryza sativa* L.) varieties irrigated with paper mill effluent. // Agriculture. 2022. Vol. 12. P. 1864. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111864>
14. Ayilara M.S., Babalola O.O. Bioremediation of environmental wastes: the role of microorganisms. // Frontiers in Agronomy. 2023. Vol. 5. P. 1-15.
15. Bhadra S., Roy U., Debroy S., Riyaz R. Aquaponics: advanced system for sustainable aquaculture production. In: Aquaculture Reimagined: Modern Approaches to Sustainable Fish Farming (Ed. by V.P. Saini, T. Paul, A.K. Singh, A. Biswal, R. Samanta). New Delhi: Biotica Publications, 2025. P. 86-111.
16. Bossier P., Ekasari J. Biofloc technology application in aquaculture to support sustainable development goals. // Microbial Biotechnology. 2017. Vol. 10. P. 1012-1016.
17. Campanati C., Willer D., Schubert J., Aldridge D.C. Sustainable intensification of aquaculture through nutrient recycling and circular economies: more fish, less waste, blue growth. // Reviews in Fisheries Science and Aquaculture. 2022. Vol. 30. P. 143-169.
18. Chow F., Macchiavello J., Cruz S.S., Fonck E., Olivares J. Utilization of *Gracilaria chilensis* (Rhodophyta: Gracilariaceae) as a biofilter in the depuration of effluents from tank cultures of fish, oysters, and sea urchins. // Journal of the World Aquaculture Society. 2001. Vol. 32. P. 215-220.
19. Chhainon Y., Serey M. The potential of aquaponics systems for enhancing food security and resource efficiency: a systematic review. 2024. Vol. 1. P. 1-9.
20. Crab R., Defoirdt T., Bossier P., Verstraete W. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. // Aquaculture. 2012. Vol. 356. P. 351-356.
21. Dauda A.B., Ajadi A., Tola-Fabunmi A.S., Akinwale A.O. Waste production in aquaculture: sources, components and managements in different culture systems. // Aquaculture and Fisheries. 2019. Vol. 4, nr 3. P. 81-88.
22. Desbonnet A., Costa-Pierce B. Aquaculture in future urban ecosystems. // Urban Aquaculture. 2005. Wallingford: CABI Publishing, P. 267-277.
23. 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. P. 346-358.
24. Emerenciano M., Slinger J., Koster G. et al. Mineral supplementation in Jade Perch (*Scortum barcoo*) aquaponics with lettuce: a comparison with hydroponics and RAS. // Animals. 2025. Vol. 15. P. 123-134.

25. Emerenciano M.G.C., Rombenso A.N., Vieira F.N., Martins M.A., Coman G.J., Truong H.H. et al. Intensification of Penaeid Shrimp culture: an applied review of advances in production systems, nutrition and breeding. // *Animals*. 2022. Vol. 12. P. 236.
26. Ganeshan A., Jha N. Solar-driven water purification technologies. // *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*. 2025. Vol. 1. P. 1-21.
27. Gao F., Li C., Yang Z.H., Zeng G.M., Feng L.J., Liu J.Z. et al. Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal. // *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 92. P. 55-61.
28. Hargreaves J.A. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. // *Aquacultural Engineering*. 2006. Vol. 34. P. 344-363.
29. Hena S., Gutierrez L., Croue J.P. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from wastewater using microalgae: a review. // *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 403. P. 124041.
30. Henriksson P.J.G., Belton B., Jahan K.M., Rico A. Measuring the potential for sustainable intensification of aquaculture in Bangladesh using life cycle assessment. // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115. nr 12. P. 2958-2963.
31. 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. P. 734610
32. Indriani Y., Ulaan M. Analysis of the Effects Aquaponic Cultivation Systems on the Growth of Water Spinach (*Ipomoea aquatica*) and Pak Choy (*Brassica rapa L.*). // *Journal Biologi Tropis*. 2024. Vol. 24. nr 4. P. 596-603.
33. Joffre O.M., Klerkx L., Khoa T.N.D.D. Aquaculture innovation system analysis of transition to sustainable intensification in shrimp farming. // *Agronomy for Sustainable Development*. 2018. Vol. 38. P. 34.
34. Kong S., Chen Z., Ghonimy A., Li J., Zhao F. Bivalves improved water quality by changing bacterial composition in sediment and water in an IMTA system // *Aquaculture Research*. 2023. Vol. 2023. P. 1-17. DOI: 10.1155/2023/6631737.
35. Kurniawan S.B., Čížková M., Ahmad A., Mohd Said N., Hartini H., Ismail A., Imron M. Autotrophic vs. heterotrophic microalgae: Juxtaposition of performances in treating organic-rich effluent. // *Desalination and Water Treatment*. 2025. Vol. 322. P. 101159.
36. Lau W.W.Y., Armbrust E.V. Detection of glycolate oxidase gene *glcD* diversity among cultured and environmental marine bacteria. // *Environmental Microbiology*. 2006. Vol. 8. P. 1688-1702.
37. MacIntyre C.M., Ellis T., North B.P., Turnbull J.F. The influences of water quality on the welfare of farmed rainbow trout: a review // *Fish Welfare* (Ed. E.J. Branson). Oxford: Blackwell Publishing, 2008. P. 150-184.
38. Maillard V.M., Boardman G.D., Nyland J.E., Kuhn D.D. Water quality and sludge characterization at raceway-system trout farms. // *Aquacultural Engineering*. 2005. Vol. 33. P. 271-284.
39. Manikanta D., Dhanda A., Yadav S., Ghangrekar M.M., Yadav R. An overview of the advances in biological and hybrid wastewater treatment technologies in developing countries with experience from developed countries // *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 351. P. 119666.
40. Mishra A., Kavita K., Jha B. Characterization of extracellular polymeric substances produced by microalgae *Dunaliella salina*. // *Carbohydrate Polymers*. 2011. Vol. 83. P. 852-857.
41. Nederlof M.A., Verdegem M.C., Smaal A.C., Jansen H.M. Nutrient retention efficiencies in integrated multitrophic aquaculture. // *Reviews in Aquaculture*. 2022. Vol. 14. P. 1194-1212.
42. Nguyen L., Aditya L., Vu H., Johir M.A.H., Bennar L., Ralph P. et al. Nutrient Removal by Algae-Based Wastewater Treatment. // *Current Pollution Reports*. 2022. Vol. 8. P. 369-383.
43. Novriadi R., Wijayanti E., Agustatik S., Hartanto W. Potensi dan interaksi limbah nitrogen dan fosfor dari pakan pada sistem produksi marikultur. // *Journal Pengawasan Budidaya*. 2020. Vol. 7. P. 5.
44. Pacheco D., Rocha A.C., Pereira L., Verdelhos T. Microalgae water bioremediation: trends and hot topics. // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. P. 1886.
45. Palm H., Knaus U., Appelbaum S., Strauch S., Kotzen B. Coupled Aquaponics Systems. 2019.
46. Pappa V.A. The use of legumes in an aquaponic agricultural system: (A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science). Department of Agriculture, Crop Production and Rural Environment, University of Thessaly. 2013. 80 pp.

47. Pant D., Kumar J. Review on fish Polyculture practices: Sustainability, innovations and challenges. // *Environment Conservation Journal*. 2025. Vol. 26. P. 257-263.
48. Roan E.H., Tiu L., Yanong R.P.E., DiMaggio M.A., Patterson J.T. Overview of Urban Aquaculture // *EDIS*. 2019. Vol. 2019. nr 6. P. 6.
49. Sa'adah R., Rarassari M., Kahirunnisa E. Consumption fish polyculture using aquaponic (polyponic) system at UPR Mandiri Abadi Palembang City. // *Journal Perikanan Unram*. 2024. Vol. 14. P. 2321-2329.
50. Sankaran S., Khanal S.K., Jasti N., Jin B., Pometto III A.L., Van Leeuwen J.H. Use of filamentous fungi for wastewater treatment and production of high value fungal byproducts: a review. // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 40. P. 400-449.
51. Soaudy M., Ghonimy A. Microbial activities integration among aquaculture systems for better sustainability - a review. // *Annals of Animal Science*. 2025. Vol. 21. P. 129.
52. Stoyanova S., Sirakov I., Velichkova K. Sustainable production: integrating medicinal plants with fish farming in aquaponics: a mini review. // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. P. 6337.
53. Wan Mahari W.A. Aquaculture wastes as a resource: an overview // *Planetary Sustainability*. 2024. Vol. 2. P. 51-60
54. Xu M., Yang M., Sun H., Gao M., Wang Q., Wu C. Bioconversion of biowaste into renewable energy and resources: a sustainable strategy. // *Environmental Research*. 2022. Vol. 214. P. 113929.
55. Yadav M.K., Yadav N.K., Chauhan R., Khati A. Chapter 3: Integrated Aquaculture Systems: A Sustainable Farming Approach // *Research Trends in Fisheries and Aquatic Sciences*. 2023. Vol. 14. P. 37-60.
56. Zamora L.N., Jeffs A.G. Feeding, selection, digestion and absorption of the organic matter from mussel waste by juveniles of the deposit-feeding sea cucumber, *Australostichopus mollis*. // *Aquaculture*. 2011. Vol. 317. P. 223-228.
57. Zhou S., Li W., He S. Microalgal diversity enhances water purification efficiency in experimental microcosms. // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2023. Vol. 11. P. 1125743. DOI: 10.3389/fevo.2023.1125743

References (for publications in Russian)

1. Gurbanova G.A., Dzhumadurdyeva G. [Methodology of using microalgae for wastewater treatment of industrial enterprises]. *Vestnik Syktyvkarskogo universiteta. Seriya 2: Estestvoznaniye. Meditsina* (Bulletin of Syktyvkar University. Series 2: Natural Sciences. Medicine). 2024. 1: 77-80.
2. Zadubrovskaya T.A., Shuklina L.V., Latypova A.V. [Phycoremediation as a new method for textile wastewater treatment]. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii* (Fundamental and Applied Research in Chemistry and Ecology). 2023: 203-206.
3. Korochenskiy I., Pronina G., Zhigin A. [Joint cultivation of fish and vegetable crops in aquaponics system using floating beds]. *Problemy rybnogo khozyaystva* (Problems of Fisheries). 2024. 25: 145-154.
4. Pis'mennaya O. [On the feasibility of using aquaponics as an effective resource for aquaculture and microgreens production]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo* (Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries). 2024. 4: 54-60.
5. Statkevich S.V. [Biotechnical standards for artificial reproduction of giant prawn *Macrobrachium rosenbergii* (De Man, 1879) in Crimea]. *Materialy IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.: Sovremennyye rybokhozyaystvennyye i ekologicheskie problemy Azovo-Chernomorskogo regiona* (Materials of Conference: Modern Fisheries and Environmental Problems of the Azov-Black Sea Region). Kerch': YugNIRO, 2017: 163-167.
6. Filippova I.N. [Economic efficiency of giant freshwater prawn cultivation in Astrakhan region]. *Neftegazovyye tekhnologii i ekologicheskaya bezopasnost'* (Oil and Gas Technologies and Environmental Safety). 2004. 3: 68-71.
7. Yurina N.A., Danilova A.A., Maksim E.A., Gneush A.N., Gorobets D.V., Trokhimchuk N.N. [Aquaponics as a method for hydroponic feed production]. *Sbornik nauchnykh trudov Krasnodarskogo nauchnogo tsentra po zootekhnii i veterinarii* (Collection of Scientific Papers of Krasnodar Scientific Center for Animal Husbandry and Veterinary Medicine). 2020. 9(1): 121-124.

UDC 628.381:574.635

**Research and developments on the use of fish farm waste
to obtain additional products: a review**

Lippo I.E.

*Institute of Integrated Fish Farming, branch of the Federal Research Center
for Animal Husbandry, Ernst VIZh, Podolsk-Dubrovitsy, Moscow oblast,
Russian Federation*

ABSTRACT. One of the promising processes for processing fish farm waste is bioconversion, which allows transforming organic aquaculture waste into useful products. The formation of nutrients in fish farm waste occurs as a result of the metabolism of aquatic organisms. The inclusion of additional organisms in the production cycle, in addition to the main object of cultivation, is the essence of the concept of integrated aquaculture, in which the products of the vital activity of one biological system serve as a nutrient base for another. Integrated fish farming systems contribute to increasing the volumes and economic efficiency of production while maintaining the optimal composition of the aquatic environment. The main sections of the review: modern approaches to fish farming waste processing technologies; the use of freshwater microalgae for wastewater treatment, the combined use of algae and bacteria, the joint maintenance of fish and crustaceans; biofloc and integrated multitrophic aquaculture systems. Particular attention is paid to innovative systems – aquaponics, integrated multitrophic aquaculture (IMTA) and biofloc technologies. The need for careful balancing of the parameters of such systems, including the stocking density of aquatic organisms, feeding regime and the species composition of associated organisms is emphasized. The need has been substantiated for expanded research on the optimization of closed aquaculture systems in the context of growing demand for fish products and tightening environmental requirements.

Keywords: wastewater treatment, aquaculture, microalgae, crabs, nitrifying bacteria, integrated fish farming

Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh (Productive Animal Biology). 2025. 3: 23-33.

Поступило в редакцию: 25.05.2025

Получено после доработки: 15.09.2025

Сведения об авторах:

Липпо Ирина Евгеньевна, м.н.с; lippo@bk.ru

УДК 636.2/3.085.14:612.397:612.664.33

DOI: 10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2025.3.34-52

СОДЕРЖАНИЕ В МОЛОЧНОМ ЖИРЕ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ОРГАНИЗМЕ И МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ИЗОМЕРОВ ЛИНОЛЕВОЙ КИСЛОТЫ (ОБЗОР)

Панюшкин Д.Е.

*ВНИИ физиологии, биохимии и питания животных – филиал ФИЦ
животноводства - ВИЖ им. Л.К. Эрнста, Боровск Калужской области,
Российская Федерация*

Конъюгированная линолевая кислота (conjugated linoleic acid. CLA) привлекает значительный научный интерес в связи с установлением её антиканцерогенных свойств. В последние годы выявлено множество других биологических эффектов, подтверждающих, что отдельные изомеры CLA, содержащиеся в молочном жире, обладают потенциалом положительного влияния на здоровье человека. Возможность применения CLA в производстве функциональных молочных продуктов стимулирует рост интереса к дальнейшим исследованиям этой группы соединений для пищевой промышленности. Основные разделы обзора: биосинтез CLA у коров; факторы, влияющие на содержание CLA в молочном жире; влияние технологических условий производства на стабильность CLA в молочных продуктах; роль CLA в питании, их влияние на здоровье человека. Пастбищное кормление, добавление растительных масел, богатых линолевой и α -линоленовой кислотами, а также рыбьего жира или их комбинаций эффективно повышают концентрацию CLA в молоке. Технологические процессы переработки молока, включая пастеризацию и производство сыров, в большинстве случаев не оказывают значительного влияния на стабильность CLA, хотя интенсивные методы термической обработки могут снижать её содержание. Перспективные направления в производстве функциональных молочных продуктов включают в себя уточнение молекулярных механизмов действия отдельных изомеров CLA в организме животных, оптимизацию кормовых стратегий и технологий переработки для максимального накопления и сохранения CLA в пищевых продуктах.

Ключевые слова: коровы, жирные кислоты, молочный жир, конъюгированная линолевая кислота, биологическая активность.

Проблемы биологии продуктивных животных. 2025. 3: 34-52.

Введение

В 1979 году были опубликованы результаты исследования, согласно которым в обжаренном говяжьем фарше присутствуют соединения, обладающие бактериальной мутагенной активностью, и вещества, подавляющие процесс мутагенеза (Pariza et al., 1979; Pariza, Hargraves, 1985). В последующих исследованиях было установлено, что конъюгированная линолевая кислота (CLA) оказывает антиканцерогенное действие (Ha et al., 1987).

Термин CLA охватывает группу октадекадиеновых кислот, характеризующихся наличием сопряжённых двойных связей в диапазоне позиций 6, 8 до 12, 14. Каждый позиционный изомер CLA допускает существование четырёх геометрических вариантов (цис-транс, транс-цис, цис-цис и транс-транс). Таким образом, структурное разнообразие CLA включает 28 возможных комбинаций позиционных и пространственных изомеров.