

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА АКВАКУЛЬТУРЫ ЧЕРЕЗ РАЗВИТИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2022 г. О.И. Бетин<sup>1</sup>, А.С. Труба<sup>2</sup>, В.П. Черданцев<sup>3</sup>, М.В. Тронина<sup>4</sup>

*1 – Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО), г. Москва, 105187*

*2 – Всероссийский научно-исследовательский институт организации производства, труда и управления в сельском хозяйстве – филиал Федерального научного центра аграрной экономики и социального развития сельских территорий Всероссийского научно-исследовательского института экономики сельского хозяйства (ВНИОПТУСХ – филиала ФНЦ ВНИИЭСХ), г. Москва, 111622*

*3 – Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова (Пермский ГАТУ), г. Пермь, 614990*

*4 – Уральский НИИ экономической безопасности и развития сельских территорий, г. Екатеринбург, 620137  
E-mail: truby.anatoly@yandex.ru*

Поступила в редакцию 24.06.2022 г.

Ежегодно мировые запасы водных биологических ресурсов истощаются, поэтому разведение и выращивание рыбы, креветок и моллюсков становится надежным способом обеспечить население достаточным количеством рыбы и морепродуктов. В последнее время аквакультура столкнулась с серьезными проблемами, включая ограниченное видовое разнообразие, трудоёмкость технологических процессов, загрязнение окружающей среды, болезни рыб и другие. Для её воспроизводства нужны новейшие технологии для повышения производства продукции и эффективности бизнес-процессов. Новейшие технологии, включая искусственный интеллект, рециркуляционные системы аквакультуры, альтернативные белки и масла для замены рыбной муки и рыбьего жира, блокчейн для маркетинга и Интернет вещей могут стать решением для устойчивого и прибыльного развития аквакультуры. В статье дается обзор некоторых из новейших технологий, а также рассматриваются возможности интеграции этих технологий в аквакультуру для прорывного развития отрасли.

**Ключевые слова:** аквакультура, информационные – цифровые технологии, искусственный интеллект, корма для рыбы.

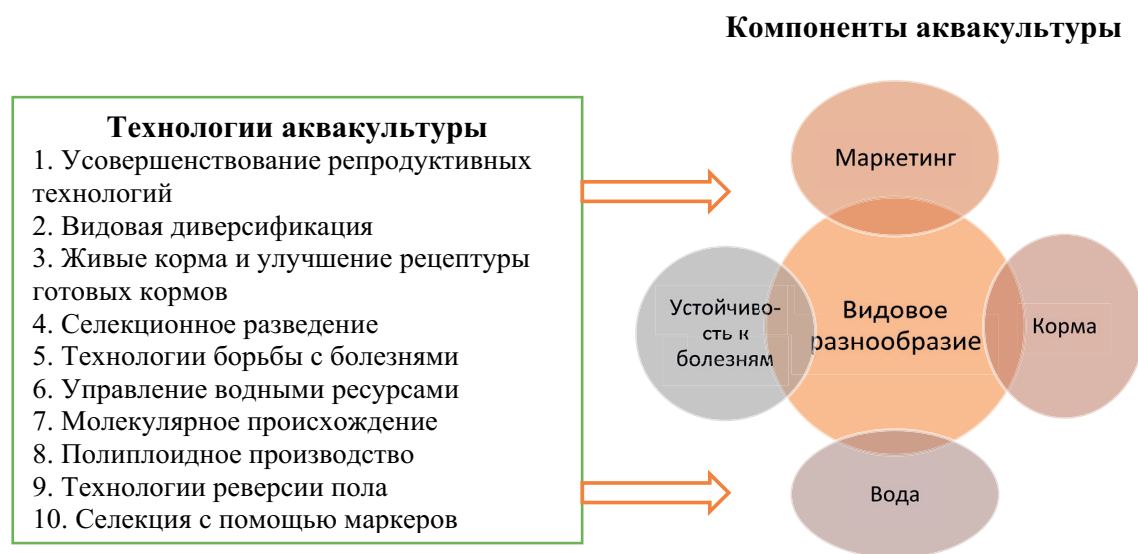
### ВВЕДЕНИЕ

Аквакультура в форме прудового разведения рыбы для продажи зародилась в Китае. Об этом свидетельствуют различные источники, самые ранние из которых датируются примерно 1020 г. до н.э. В последние несколько десятиле-

тий аквакультура стала самым быстрорастущим сектором сельского хозяйства. По оценкам Food and Agriculture Organization (FAO), в период 2013–2020 гг. продукция аквакультуры превысила продукцию дикого рыболовства (FAO, 2020).

На рисунке 1 представлены достижения науки и технологий с конца XX в. и по настоящее время, которые стали драйверами развития аквакультуры. Многие технологии применялись в различных компонентах аквакультуры, с общей целью – повышение эффективности производства продукции.

микроводоросли, коловратки, креветки и других веслоногих рачков, разведённых в инкубаториях, устранило проблему в культивировании некоторых морских видов рыбы (Conceição et al, 2010); селекционное разведение с помощью количественной генетики значительно улучшило коммерчески важные при-



**Рис. 1.** Технологии, применяемые в аквакультуре за последние 50 лет.

С точки зрения видов, кормов, производственных систем, болезней, продуктов, бизнес-структур и маркетинга аквакультура более диверсифицирована, чем другие сектора сельского хозяйства. Научные и технологические достижения принесли пользу практически всем аспектам аквакультуры (маркетинг, видовое разнообразие, корма, состояние водной среды). Многие из представленных на рисунке технологии внесли значительный вклад в увеличение производства данной продукции.

Например, усовершенствование репродуктивных технологий позволило замкнуть жизненные циклы аквакультурных видов, что обеспечило их видовую диверсификацию (Вебер, Ли, 2014); использование живых кормов, включая

знаки более 60 разновидностей организмов аквакультуры (Гьедрем, Робинсон, 2014); технология реверсии пола и ДНК-маркеры, связанные с определением пола, позволили получить однополых особей тилапии, жёлтого сома и речных креветок; молекулярное происхождение сделало возможным внутрисемейный отбор при массовых скрещиваниях, тем самым была снижена опасность инбридинга (Чу и др., 2020); картирование QTL (количественного локуса признаков) и селекция с помощью маркеров (MAS) сделали возможным отбор признаков, которые определяются отдельными генами и несколькими основными генами (Хьюстон и др., 2020); улучшенные рецептуры кормов, основанные на пищевых потребностях каждого вида

рыб, позволили повысить коэффициент конверсии корма и снизить стоимость корма (Такон, Метиан, 2015); технологии борьбы с болезнями снизили заболеваемость в аквакультуре (Келли Ренукдас, 2020).

Несмотря на то, что представленные выше и многие другие инновационные технологии способствовали значительному развитию данного направления, для обеспечения постоянно растущего спроса на рыбу и морепродукты увеличивающегося населения Земли, необходимо наращивать объёмы производства продукции. Ухудшение состояния окружающей среды, сокращение предложения по сырью для производства рыбной муки, являющейся важным ингредиентом кормов негативно влияет на возможности производства достаточного количества продукции аквакультуры для удовлетворения спроса на продукцию.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Сегодня все больше и больше новых технологий разрабатываются и внедряются в отрасль аквакультуры. Новейшие технологии предлагают новые способы повышения мирового производства рыбы и морепродуктов и повышению прибыльности аквакультуры. Они включают в себя геномную селекцию (GS), редактирование генома (GE), информационные и цифровые технологии, замкнутые системы аквакультуры с использованием солнечной энергии, аквакультуру в открытом океане («оффшорная» аквакультура), новые маркетинговые стратегии на основе блокчейна, интеграция различных компонентов аквакультуры с Интернетом вещей (IOT) и другие (рис. 2).

Информационные и цифровые технологии имеют весьма широкий инженерный ряд, включая: робототехнику,

дроны, датчики, искусственный интеллект (ИИ), 3D-печать, дополненная реальность (AR), визуальную реальность (VR) и блокчейн. Эти технологии связаны с фермами через спутники, интернет вещей (IoT) и мобильные телефоны. Безусловно, формат статьи не позволяет описать все эти технологии, поэтому далее рассмотрим некоторые из них.

### 1. Робототехника в аквакультуре.

Производство аквакультуры – сложный процесс. Многие этапы, включая кормление, очистку прудов и сетей, наблюдение за поведением и удаление больных рыб, являются трудоёмкими и дорогостоящими, и без использования машин они трудновыполнимы. Решить этих сложные задачи в аквакультуре помогают роботы, которые могут применяться для кормления, очистки прудов и сетей, введения вакцин и удаления больных рыб.

Следовательно, робототехника имеет большой потенциал для выполнения некоторых трудоёмких и рискованных задач в данном процессе. Например, автоматизированные подводные роботы уже использовались для проверки и очистки состояния сетей в лососевой индустрии, что привело к сокращению числа операций, выполняемых человеком (Паспалакис и др., 2012). Они также использовались для наблюдения за состоянием здоровья рыб, мониторинга и предотвращения побегов выращиваемой рыбы.

На самом деле, роботы могут сделать аквакультуру более прибыльной, потому что могут работать непрерывно в плохих условиях окружающей среды и без помощи человека. Например, можно следить за поведением рыб в режиме реального времени. (Круусмаа и др., 2020).

Однако важно отметить, что полностью автоматизированная аквакультура в настоящее время всё ещё невозможна

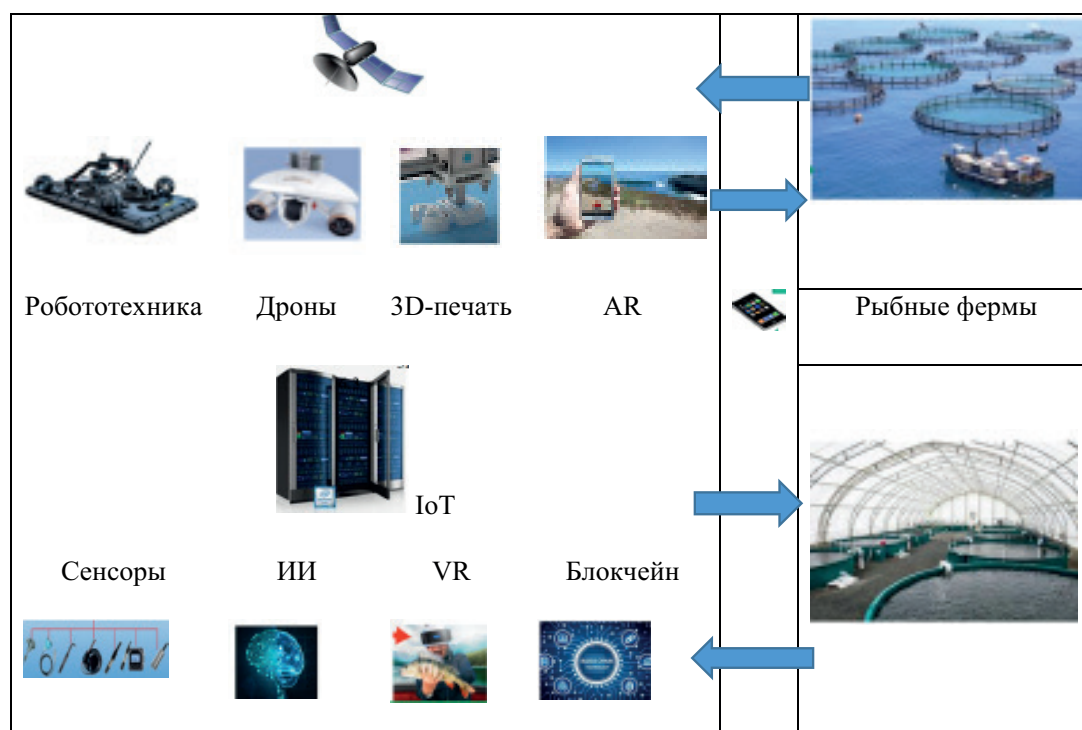


Рис. 2. Информационные/цифровые технологии в аквакультуре.

и может реализоваться не ранее, чем через 5–10 лет. Однако несомненно, что ближайшие годы принесут существенные изменения в цифровизацию аквакультуры, и разведение рыбы с помощью роботов будет развиваться более активно. Однако, следует отметить, что любая автоматизация с использованием робототехники должна учитывать специфику каждого вида, культурных систем и различных сред.

2. Датчики для измерения параметров воды, контроля кормления и состояния здоровья рыбы.

Их можно использовать для сбора параметров воды, включая уровни растворённого кислорода, значения pH, солёность, мутность и концентрацию загрязняющих веществ. На самом деле, многие из упомянутых выше роботов используют датчики для получения данных в режиме реального времени в воде. В аквакультуре были разработаны и применяются биосенсоры для анализа

уровней растворённого кислорода, солёности и температуры воды (Су и др., 2020). При разведении лососевых пород рыб можно отслеживать и регистрировать частоту сердечных сокращений и метаболизм отдельных особей. С помощью подводных датчиков, подключенных к сети Интернет, можно отслеживать состояние голода культивируемой рыбы в садках, прудах и реках и, таким образом, контролировать режим кормления. Правильное использование графика кормления, в соответствии со статусом голода, может реально регулировать потребление корма, тем самым снизить общие производственные затраты.

Датчики в воде в сочетании с облачным управлением и мобильным подключением будут поддерживать идеальную среду для рыб и обеспечивать оптимальное кормление для роста. В будущем важно разработать датчики, которые будут использоваться в режиме реального времени для измерения уров-

ня стресса у отдельных рыб и обнаружения патогенов в воде. Они должны быть способны подавать сильные сигналы, которые смогут быть обнаружены наземными, морскими или спутниковыми устройствами. Примером таких датчиков, уже разработанных и используемых на практике, могут послужить носимые устройства, определяющие уровень кортизола для измерения стресса и общего состояния здоровья человека.

3. Искусственный интеллект в аквакультуре.

Не смотря на то, что роботы и датчики обеспечивают быстрый сбор данных в режиме реального времени, принимать правильные решения на основе собранных данных по-прежнему очень сложно из-за большого объёма данных. В настоящее время несколько научно-исследовательских институтов и стартапов, занимающихся технологиями аквакультуры, изучают и применяют искусственный интеллект (ИИ) для принятия более качественных и быстрых решений. С помощью ИИ производство аквакультуры может быть увеличено в течение короткого периода времени, что делает аквакультуру менее трудоемкой сферой.

Искусственный интеллект может использоваться в управлении кормушками, в контроле качества воды, в сборе и переработке продукции. В аквакультуре с его помощью можно контролировать потери ресурсов, при этом затраты сокращаются до 30% (Джотисваран и др., 2020).

Таким образом, искусственный интеллект может обеспечить контроль над системами производства рыбы с меньшими затратами, в том числе на техническое обслуживание оборудования. Тем не менее, он все еще имеет ограничения из-за недостаточности доступных данных. Их набор становится все более

важным, поэтому рыбоводческим фермам и крупным компаниям, занимающимся аквакультурой, необходимо делиться данными о производстве и маркетинге своей продукции. Только при наличии необходимых данных о продукции каждого вида в различных условиях культивирования и создания общедоступных баз, исследователи и фермеры смогут использовать более широкий спектр информации для разработки алгоритмов и принятия более точных и эффективных решений.

Возможной прорывной технологией в аквакультуре может стать замена наиболее важного кормового ингредиента, а именно, рыбной муки и рыбьего жира. Они являются побочными продуктами более мелкой кормовой рыбы, включая сельдь, криль и другие биоресурсы. Быстрый рост индустрии аквакультуры и растущий спрос на выращиваемую морскую рыбу привели к увеличению спроса и цен на эти ингредиенты за последние несколько лет. При нынешних растущих темпах производства продукции аквакультуры поставки рыбной муки не в состоянии удовлетворить потребности отрасли аквакультуры. (Хобарт и др., 2020).

В этой связи проводятся исследования на поиск альтернативы рыбной муке. Так, исследователи получили подтверждение эффективности замены рыбной муки на растительные белки, в том числе соевый белок. Кроме того, в корма для рыб в качестве заменителей рыбной муки были включены микро- и макроводоросли. В настоящее время высококачественный корм из водорослей по-прежнему стоит дорого, но дает многообещающие результаты (Хан и др., 2018). Многие компании-производители аквакормов работают над его улучшением, используя водоросли и повышая их ценовую доступность.



Еще один перспективный вариант замены рыбной муки – это белки на основе насекомых. Черная львиная муха и сверчки имеют хорошие показатели и могут стать альтернативой рыбной муке. Были установлены протоколы культивирования этих насекомых с использованием пищевых отходов (Ван, Шеломи, 2017). Несколько компаний начали производить этих насекомых и расширили производство, чтобы снизить затраты.

Третий тип альтернативного белка – это одноклеточные белки (SCP). SCP производятся грибами, бактериями и водорослями. SCP имеют потенциал для удовлетворения потребностей в белке в индустрии кормов для аквакультур. Эксперименты с кормлением показали, что у атлантического лосося, радужной форели и белоногих креветок SCP способны заменить рыбную муку (Джонс и др, 2020). Таким образом, этот белок является перспективным заменителем рыбной муки.

В отношении рыбьего жира следует сказать, что в последние десятилетия были достигнуты значительные успехи в его замене в рецептурах кормов для рыб на растительные масла (Насопулу, Забетакис, 2012). Представляется, что растительные масла, такие как пальмовое и рапсовое, являются альтернативой рыбьему жиру и могут быть использованы в качестве компонентов кормов в аквакультуре.

## ВЫВОДЫ

Аквакультура играет важную роль в обеспечении населения высококачественными белками и много лет является самым быстрорастущим сектором производства продуктов питания. Потребность в рыбе и морепродуктах в ближайшие десятилетия существенно возрастет, поскольку растет числен-

ность населения. Развитие аквакультуры требует новых и прорывных технологий, которые смогут произвести революцию в индустрии аквакультуры. Хотя сектор аквакультуры является одним из самых медленных в плане внедрения новых технологий, последние достижения могут открыть возможности для устойчивого и прибыльного его развития. Однако существует большой разрыв между наличием новейших технологий и их реальным применением в индустрии аквакультуры. Интеграция технологий в системы аквакультуры – это, безусловно, сложный процесс. Для него требуется сочетание различных типов оборудования для аквакультуры, включая оборудование для обогащения кислородом, оборудование для кормления, различные типы датчиков и оборудование для очистки воды. Для работы этого оборудования необходимы соответствующие интерфейсы связи, режим передачи и другие параметры. Компоновка объектов в интегрированной системе аквакультуры должна быть оптимизирована, чтобы максимизировать их эффективность. Все эти факторы делают невозможным выполнение данной задачи для одного фермера или компании, занимающейся аквакультурой. Поэтому, рыбоводы, ученые, инженеры, разработчики программного обеспечения и экономисты должны работать вместе для эффективной интеграции технологий в отрасль, чтобы сделать ее более устойчивой и прибыльной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вебер Г.М., Ли К.-С. Текущие и будущие вспомогательные репродуктивные технологии для видов рыб, текущие и будущие репродуктивные технологии и мировой производитель продуктов питания Springer // Достижения в области экспериментальной медицины и биологии. 2014. № 752, Р. 33–76. URL: <https://>

doi.org/10.1007/978-1-4614-8887-3\_3 (дата обращения: 17.06.2022)

Ван Ю.-С., Шеломи М. Обзор чёрной солдатской мухи (*Hermetia illucens*) в качестве корма для животных и пищи для человека // *Foods*. 2017. № 6, Р. 91. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.09.003> (дата обращения: 17.06.2022)

Гьедрем Т., Робинсон Н. Достижения в области селекции водных видов: обзор сельскохозяйственных наук, № 5. 2014. Р. 1152. URL: <https://doi.org/10.4236/as.2014.512125> (дата обращения: 17.06.2022)

Джотисваран В., Велумани Т., Джаяраман Р. Применение искусственного интеллекта в рыболовстве и аквакультуре // *Biotica Research Today*. 2020. № 2. Р. 499–502. URL: <file:///C:/Users/USER/Desktop/Downloads/257-Article%20Text-378-1-10-20200702.pdf> (дата обращения: 17.06.2022)

Джонс С.У., Карпол А., Фридман С., и др. Последние достижения в области использования одноклеточного белка в качестве кормового ингредиента в аквакультуре. Современное мнение в области биотехнологий. 2020. № 61, Р. 189–197. URL: <https://doi.org/10.1016/j.sorbio.2019.12.026> (дата обращения: 17.06.2022)

Келли А.М., Ренукдас Н.Н. Борьба с болезнями водных животных, управление здоровьем аквакультуры // *Elsevier*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813359-0.00005-1> (дата обращения: 17.06.2022)

Круусмаа М., Гклива Р., Тухтан Й. и др. Поведенческая реакция лосося на роботов в морской клетке для аквакультуры // *Королевское общество открытой науки*. 2020. № 7, Р. 191–220. URL: <https://doi.org/10.1098/rsos.191220> (дата обращения: 17.06.2022)

Насопулу И., Забетакис И. Преимущества замены рыбьего жира растительными маслами в комбикормах для рыб. Обзор // *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technology*. 2012. № 47, Р. 217–224. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.018> (дата обращения: 17.06.2022)

Паспалакис С., Мойрогиоргу К., Папандрулакис Н. и др. Автоматизированный контроль сети для рыбных клеток с использованием методов обработки изображений // *IET Image Processing*. 2020. № 14, Р. 2028–2034. URL: <https://doi.org/10.1049/iet-ipr.2019.1667> (дата обращения: 17.06.2022)

Су Х., Сутарли Л., Лох Х.Дж. Датчики, биосенсоры и аналитические технологии для контроля качества воды в аквакультуре. Исследование: Идеи для сегодняшних инвесторов, 2020. Р. 8272705. URL: <https://doi.org/10.34133/2020/8272705> (дата обращения: 17.06.2022)

Такон А.Г., Метиан М. Кормовые вопросы: Удовлетворение потребностей аквакультуры в кормах. Обзоры в области науки о рыболовстве и аквакультуры. 2015. № 23, Р. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1080/23308249.2014.987209> (дата обращения: 17.06.2022) (10)

Хан Д., Чжан Х., Чжан У. и др. Пересмотр использования рыбной муки и связанных с этим последствий в китайской аквакультуре // *Обзоры в области аквакультуры*. 2018. № 10, Р. 493–507. URL: <https://doi.org/10.1111/raq.12183> (дата обращения: 17.06.2022)

Хобарт А., Васави Р., Махавадия Д. и др. Замена рыбной муки и рыбьего жира для приготовления водных кормов с использованием альтернативных источников: обзор // *Журнал экспериментальной зоологии Индия*. 2020. № 23, Р. 13–21. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338392541\\_FISH\\_MEAL\\_AND\\_FISH\\_OIL\\_REPLACEMENT\\_FOR\\_AQUA\\_FEED\\_FORMULATION\\_BY\\_USING\\_ALTERNATIVE\\_SOURCES\\_A\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/338392541_FISH_MEAL_AND_FISH_OIL_REPLACEMENT_FOR_AQUA_FEED_FORMULATION_BY_USING_ALTERNATIVE_SOURCES_A_REVIEW) (дата обращения: 17.06.2022)

Хьюстон Р.Д., Бин Т.П., Маккейн Д.Дж. и др. Использование геномики для ускорения генетического совершенствования в аквакультуре. Природа Рассматривает Генетику. 2020. № 21, Р. 389–409. URL: <https://www.nature.com/articles/s41576-020-0227-y> (дата обращения: 17.06.2022)

Чу Ю., Ван К., Дж. К. и др. Обзор конструкций садков и резервуаров для содер-

жания рыбы в открытом море // Аквакультура. 2020. № 519, Р. 734. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.734928> (дата обращения: 17.06.2022)

FAO Состояние мирового рыболовства и аквакультуры. Устойчивое развитие в действии, Rome, Italy, 2020. URL: <https://www.fao.org/documents/card/ru/c/ca9229en/> (дата обращения: 17.06.2022)

org/documents/card/ru/c/ca9229en/ (дата обращения: 17.06.2022)

*Conceição L.E., Yúfera M., Makridis P. et al.* Live feeds for early stages of fish rearing. *Aquaculture Research*. 2010. № 41, Р. 613–640. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2009.02242.x> (дата обращения: 17.06.2022)

## AQUACULTURE AND ARTIFICIAL REPRODUCTION

### INCREASING THE EFFICIENCY OF AQUACULTURE PRODUCTION THROUGH THE DEVELOPMENT OF INFORMATION AND DIGITAL TECHNOLOGIES

© 2022 г. O.I. Betin<sup>1</sup>, A.S. Truba<sup>2</sup>, V.P. Cherdantsev<sup>3</sup>, M.V. Tronina

1 – Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO), Moscow, 105187

2 – Russian Scientific-research Institute of organization of production, labor and management in agriculture is a branch of Federal state budgetary scientific institution «Federal research center of agrarian economy and social development of rural territories All-Russian research Institute of agricultural Economics» (VNIIOPTUSKH – branch of FSBSI Federal scientific center VNIIESKH, Moscow, 111622

3 – D.N. Pryanishnikov Perm State Agro-Technological University (FSBEI HE «Perm SATU»), Perm, 614095

4 – Ural Research Institute of Economic Security and Rural Development, Yekaterinburg, 620137

Every year, the world's reserves of aquatic biological resources are depleted, so the breeding and cultivation of fish, shrimp and shellfish becomes a reliable way to provide the population with enough fish and seafood. Recently, aquaculture has faced serious problems, including limited species diversity, labor intensity of technological processes, environmental pollution, fish diseases and others. For its reproduction, the latest technologies are needed to increase the production of products and the efficiency of business processes. The latest technologies, including artificial intelligence, aquaculture recycling systems, alternative proteins and oils to replace fish meal and fish oil, blockchain for marketing and the Internet of Things can be a solution for sustainable and profitable development of aquaculture. The article provides an overview of some of the latest technologies, and also discusses the possibilities of integrating these technologies into aquaculture for the breakthrough development of the industry.

*Keywords: aquaculture, information and digital technologies, artificial intelligence, fish feed.*