

# РОБОТЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ АКВАКУЛЬТУРЫ

**В.Н. Ле**

*Военный учебно-научный центр Военно-морского флота «Военно-морская академия»*  
Россия, 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская набережная, 17/1  
E-mail: lenghia18071999@gmail.com

**А.Л. Ронжин**

*Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук*  
Россия, 119178, Санкт-Петербург, 14-я линия В.О., 39  
E-mail: ronzhin@iias.spb.su

**Ключевые слова:** интеллектуальная рыбная ферма, технологии искусственного интеллекта, Интернет вещей, классификация видов рыб, роботы в аквакультуре.

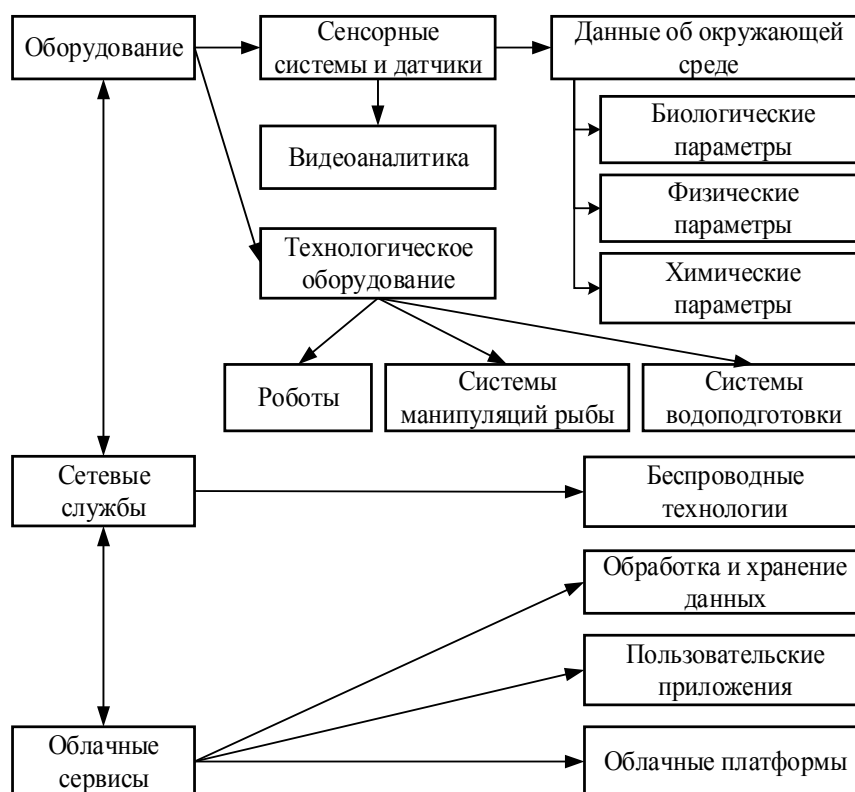
**Аннотация:** Технологии искусственного интеллекта, Интернета вещей, сенсорные сети, техническое зрение и робототехника все чаще внедряются в производстве аквакультуры, заменяя традиционные трудовые ресурсы, снижая влияние человеческого фактора и выполняя мониторинг и интеллектуальный анализ больших данных разнообразных параметров производственной среды в режиме реального времени. Быстрая и точная диагностика качества воды, донных отложений, количества корма, роста и заболеваний рыб посредством дистанционной обработки и классификации изображений, поступающих со стационарных подводных видеокамер, на основе технологий искусственного интеллекта и Интернета вещей помогают предотвратить распространение болезней, минимизировать экономические потери и повысить безопасность пищевых продуктов. Интеллектуальные подводные роботы вместо водолазов используются при проверке повреждений сетей садков и оборудования. В работе проанализированы основные проблемы внедрения цифровых технологий и роботов при производстве аквакультуры, обсуждаются перспективные направления исследований.

В традиционном производстве аквакультуры все технологические этапы, такие как подготовка воды, выведение породы, кормление и уход в процессе выращивания, выполняются вручную. Рассмотрим несколько примеров технологических операций, выполняющихся в настоящее время вручную, но от их качества и оперативности зачатую зависит выживаемость всей выращиваемой продукции. Например, одним из регулярных процессов, требующих постоянного контроля, является водоподготовка. Пробы воды берутся вручную два раза в день. Этот процесс занимает много времени и не может обеспечить быструю очистку воды в отдельных случаях, когда качество воды в пруду/резервуаре внезапно меняется. Или другой пример, возникновение болезни рыбы, выращиваемой в прудах, достаточно сложно диагностировать на ранних стадиях, и лечение начинается только тогда, когда отдельные особи умирают и всплывают на поверхность воды. Расчет количества выдаваемого корма, мониторинг остатков несъеденного оседающего на дне под садками вместе с продуктами метаболизма, загрязняющих акваторию, вызывающих гниение, снижение кислорода в воде и гибель выращиваемой продукции в конечном итоге. Наконец, еще один ручной трудоемкий процесс, отнимающий много времени и сил – это предпродажный подсчет рыбы, где

каждая особь отдельно обрабатывается. Четыре вышеперечисленных примера требуют ручного труда и значительно влияют на прибыль в производстве аквакультуры [1].

Таким образом, для решения проблем традиционного рыбоводства и развития интеллектуальных технологий аквакультуры необходимо применение роботов, стационарных сенсорных и активационных устройств взаимодействующих по проводным и беспроводным средствам связи в водной и подводной инфраструктуре. Сочетание технологий и экспертных знаний искусства ведения сельского хозяйства открывает новые перспективы интеллектуальной индустрии аквакультуры, где технологии искусственного интеллекта (ИИ), Интернета вещей (IoT), системы автоматизации и робототехника меняют способы управления и производства. Эти технологии от управления качеством воды до мониторинга здоровья особей аквакультуры меняют традиционный ландшафт отрасли, создают новые возможности для роста производства, помогая создать устойчивую среду для рыбоводства.

технологий Интернета вещей в сочетании с облачными вычислительными ресурсами требует формирования трех основных технологических уровней: оборудование, сетевые службы и облачные сервисы (рис. 1). Уровень оборудования включает датчики, технологическое оборудование, контроллеры и терминалы сбора данных. Датчики собирают информацию об окружающей среде, такую как pH кислотность, температура, соленость, электропроводность, содержание кислорода, азота, нитрита, уровень воды, а также видеоизображения, позволяющие оценить поведение и болезни, возникающие при производстве аквакультуры.



**Рис. 1.** Трехуровневая архитектура цифрового производства аквакультуры.

К технологическому оборудованию относятся генераторы кислорода, дозаторы корма, клапаны насосов и др. На сетевом уровне часто используются беспроводные соединения, такие как Bluetooth, Wi-Fi, 3G/4G, Lo-Ra, NB-IoT и другие технологии беспроводной передачи данных, обеспечивающие связь между устройствами и

облачными сервисами. Перечисленные беспроводные технологии эффективны для передачи данных в воздушном пространстве и сильно ограничены в водной среде, поэтому, как правило конечные сенсорные и активационные устройства под водой связаны кабельными средствами с надводными трансляторами беспроводной связи. Более детально современные системы подводной связи, позиционирования и навигации роботов в водной среде описаны в работе [2].

Облачные сервисы включают платформы и мобильные приложения, предназначенные для хранения, обработки данных и предоставления полезной справочной информации, пользовательские сервисы по автоматизации производства аквакультуры. Применение систем Интернета вещей в аквакультуре имеет явные преимущества, но при увеличении степени автоматизации или масштабирования производства сразу происходит рост количества датчиков, объема анализируемых параметров и хранящихся данных. В связи с чем становятся актуальными проблемы кибербезопасности и оптимизации вычислительных затрат, особенно при крупномасштабном рыбном хозяйстве и систем промышленной очистки воды [3-4].

Классификация и обнаружение заболевших рыб является важной задачей для повышения эффективности промышленной аквакультуры. Применение технологий искусственного интеллекта и интернета вещей открывает новые перспективы в определении заболевших рыб, диагностировании вида болезни, своевременном разделении здоровых и заболевших в процессе разведения [5].

В работе [6] рассматривается классификация видов рыб на основе принципов работы глубокого обучения и Интернета вещей. В процессе глубокого обучения были использованы данные восьми различных видов рыб из Бангладеш, которые были разделены на два набора: setup-1 (S1) содержащий оригинальные изображения, и setup-2 (S2) содержащий изображения, которые были размыты. Затем семь современных моделей глубокого обучения из ImageNet были протестированы на обоих стандартных настройках: InceptionV3, Xception, DenseNet121, DenseNet169, DenseNet201, InceptionResNetV2 и ResNet152V2. В части IoT была разработана архитектура с применением различных типов сенсоров и микроконтроллеров. Модели глубокого обучения и компоненты на базе IoT достигли для setup-1 96% для всех структур DenseNet121, DenseNet169 и DenseNet201, в то время как для setup-2 было достигнуто 96% с моделью Xception. Наконец, гибридная модель (CNN + Convolutional LSTM) с точностью 97% превосходит все упомянутые выше методы. В исследовании было ограничение на использование данных только по восьми видам рыб, что позволило проводить обработку изображений в режиме реального времени. Недостатками методов распознавания видов рыбы на основе машинного обучения являются необходимость априорных экспертных знаний, длительная ручная подготовка данных [7]. Алгоритмы глубокого обучения на основе сверточных нейронных сетей способны прогнозировать, обучаясь на основе входных данных и синтетических изображений, и обладают превосходной вычислительной производительностью [8-9].

Болезни рыб в аквакультуре представляют собой значительную угрозу продовольственной безопасности [10-11]. Выявление зараженных видов рыб в аквакультуре остается затруднительным на ранней стадии из-за отсутствия необходимой инфраструктуры. Своевременное выявление зараженной рыбы является обязательным шагом для предотвращения распространения заболевания и снижения экономических потерь в аквакультуре. В работе [12] обсуждаются ранние методы обнаружения и диагностики заболеваний рыб с использованием различных алгоритмов машинного обучения, включая дерево решений, логическую регрессию, наивный Байесовский классификатор, машину опорных векторов (SVM) и многослойный перцептрон (MLP). Набор данных составлен из изображений рыб с симптомами EUS, а

также изображений неинфицированной рыбы. Система на основе SVM для обнаружения и предотвращения EUS у рыб достигла точности 85,24% на исходном наборе данных с использованием полиномиального ядра и 82,75% на расширенном наборе данных с использованием ядра Гаусса.

Максимальный рост биомассы аквакультуры при минимизации производственных затрат является основной целью модернизации рыбохозяйственных технологий, которая может быть достигнута путем оптимизации факторов, которые оказывают наибольшее влияние на рост рыбы: скорость кормления, температура и содержание растворенного кислорода. В работе [13] обсуждаются четыре стратегии управления ростом рыбы: 1) слежение за траекторией роста рыбы, ограничивая при этом потребление корма, температуру и содержание растворенного кислорода; 2) слежение за отношением потребляемого корма к скорости роста рыбы; 3) слежение за балансом между траектории скорости роста, потребляемой энергией и затратами на корм; 4) слежение за максимизацией скоростью роста рыбы при минимизации затрат. Предложенные математические модели были апробированы в реальном биологическом процессе жизнедеятельности рыбы *Nilotic* (*Oreochromis niloticus*) и подтвердили возможность оптимизации стратегий управления в зависимости от вида рыбы, цен на корм и потребляемые ресурсы, времени выращивания.

Работа профессионального дайвера для осмотра, выявления повреждений, ремонта сетей или их очистки водорослей является тяжелой и опасной. В крупномасштабных промышленных садковых производствах аквакультуры радиус и глубина сетей садков могут достигать более 15 м, что делает рабочую среду для дайвера крайне небезопасной при выполнении подводной работы в океане в течение длительного времени. Поэтому потребность интеллектуальных роботов для мониторинга и обслуживания сетей под водой становится очевидной. В работе [14] разработан прототип биоморфного робота-тунца, оснащенный трехмерной системой управления, который двигается по спирали для проверки глубоководных сетей. Кинематическая модель движения робота основана на применении двойного сустава, аналогичного у тунца, с дополнительным устройством тяги на хвосте, обеспечивающим гибкость движения. Система управления использует метод нечеткой логики на основе PID регуляторов для контроля скорости спуска и углом поворота во время движения по спирали, что позволило роботу перемещаться по заранее заданному эталонному пути в условиях возмущающих воздействий подводных течений и других негативных факторов.

Интеллектуальные системы аквакультуры на основе цифровых двойников, не только также отслеживают текущие параметры процесса выращивания рыбы, но и прогнозируют дальнейшее состояние, в том числе управляемый рост рыбы, минимизируя затраты за счет поддержания требуемых значений температуры, растворенного кислорода, объема подаваемого корма [15]. Технологии технического зрения обработки подводных изображений позволяет операторам непрерывно наблюдать и анализировать состояние рыбы, обеспечивая при этом качество и безопасность конечной продукции, предоставляя собранные данные клиентам и органам, сертифицирующим пищевые продукты. Таким образом, цифровые интеллектуальные системы управления помогают операторам производства аквакультуры оптимизировать подачу корма, контролировать рост рыбы, повышать ее выживаемость, одновременно оптимизируя коэффициент конверсии корма.

Длительное садковое производство со временем требует обслуживания сетей, их контроль целостности и очистку от нарастающих водорослей. Для решения этих задач особенно для глубоководных сетей актуально применение роботов, производящих

мониторинг всех поверхности сетей и монотонные длительные операции по их очистке под водой.

Проведенный анализ основных задач цифровизации и роботизации технологических процессов производства аквакультуры показал актуальность дальнейших исследований по формализации технологического процесса выращивания аквакультуры с применением передовых технологий искусственного интеллекта, Интернета вещей и робототехники.

## Список литературы

1. Vo T.T.E., Ko H., Huh J., Kim Y. Overview of Smart Aquaculture System: Focusing on Applications of Machine Learning and Computer Vision // *Electronics*. 2021. Vol. 10, No. 22. P. 2882. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10222882>.
2. Ле В.Н., Ронжин А.Л. Способы и технические средства позиционирования и навигации роботов в водной среде // *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2023. № 6 (116). С. 167-178. DOI: [10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178](https://doi.org/10.35330/1991-6639-2023-6-116-167-178).
3. Wang C., Li Z., Wang T., Xu X., Zhang X., Li D. Intelligent fish farm – the future of aquaculture // *Aquaculture International*. 2021. Vol. 29. P. 1-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00773-8>.
4. Fedorchenko E., Novikova E., Danilov A., Saenko I. Towards the Testbed and Dataset for Analysis of Water Treatment Systems Security. Proceedings of the 4th International Conference on Data Science and Applications (ICDSA 2023) // Malaviya National Institute of Technology. Jaipur, India. July 14-15, 2023. Springer Nature Computer Science.
5. Vásquez-Quispesivana W., Inga M., Betalleluz-Pallardel I. Inteligencia artificial en acuicultura: fundamentos, aplicaciones y perspectivas futuras // *Scientia Agropecuaria*. 2022. Vol. 13 (1). P. 79-96. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.008>.
6. Ahmed M.A., Hossain M.S., Rahman W., Uddin A.H., Islam M.T. An advanced Bangladeshi local fish classification system based on the combination of deep learning and the internet of things (IoT) // *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023, Vol. 14. P. 100663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100663>.
7. Urbanova P., Bozhynov V., Cisar P., Zelezny M. Classification of fish species using silhouettes. *Bioinformatics and Biomedical Engineering*. Cham: Springer, 2020. P. 310-319.
8. Rauf H.T., Lali M.I.U., Zahoor S., Shah S.Z.H., Rehman A.U., Bukhari S.A.C. Visual features based automated identification of fish species using deep convolutional neural networks // *Computers and electronics in agriculture*. 2019. Vol. 167. P. 105075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105075>.
9. Xu X., Li W., Duan Q. Transfer learning and se-resnet 152 networks-based for small-scale unbalanced fish species identification // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 180. P. 105878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105878>.
10. Nayak K.K., Pradhan J., Das B.K. Original Research Article Characterization, pathogenicity, antibiotic sensitivity and immune response of *Flavobacterium columnare* isolated from *Cirrhinus mrigala* and *Carassius auratus* // *International journal of current microbiology and applied sciences*. 2014. Vol. 3, No. 11. P. 273-287.
11. Tacon A.G.J., Metian M. Fish Matters: Importance of Aquatic Foods in Human Nutrition and Global Food Supply // *Reviews in Fisheries Science*. 2013. Vol. 21 (1). P. 22-38. DOI: <https://doi.org/10.1080/10641262.2012.753405>.
12. Sujatha K., Mounika P. Evaluation of ML Models for Detection and Prediction of Fish Diseases: A Case Study on Epizootic Ulcerative Syndrome // *2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*. 2023. P. 1-7. DOI: [10.1109/ICEEICT56924.2023.10156914](https://doi.org/10.1109/ICEEICT56924.2023.10156914).
13. Chahid A., N'Doye I., Majoris J. E., Berumen M. L., Laleg-Kirati T. M. Model predictive control paradigms for fish growth reference tracking in precision aquaculture // *Journal of Process Control*. 2021, Vol. 105, P. 160-168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.07.015>.
14. Chen Y., Qiao J., Liu J., Zhao R., An D., Wei Y. Three-dimensional path following control system for net cage inspection using bionic robotic fish // *Information Processing in Agriculture*. 2022, Vol. 9, P. 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.12.002>
15. Bekarev A., Ivashko E., Ivashko V. Aquaculture digitalization: Polling karelian fish farmers // *Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2023. Vol. 362. P. 363-372.