

Научная статья
УДК 519.876.5:005.52:639.3.03
<https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-83-99>
EDN OYBPUW

Теоретические положения для поддержки принятия решений при размещении объектов автономного рыбоводного кластера в Каспийском бассейне

**Алла Владимировна Олейникова¹, Марина Николаевна Сорокина²,
Александр Александрович Сорокин^{3✉}, Александр Александрович Олейников⁴**

^{1, 3, 4} *Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, alsorokin2@list.ru*

² *Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук,
Ростов-на-Дону, Россия*

³ *Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина –
филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Астрахань, Россия*

Аннотация. Произведено построение математического аппарата для решения задачи определения места расположения морских рыбоводных ферм на базе формируемого информационного пространства, включающего 6 совокупностей признаков, которые охватывают гидрофизические, биологические, социально-экономические и инфраструктурные характеристики акватории Каспийского бассейна. Проведена формализация потенциала биологического роста через мультипликативную гауссовскую модель, использующую правило трех сигм для стенобионтных и эврибионтных видов водных биологических ресурсов. Реализована оценка экологической стабильности и ветеринарной безопасности участка через расчет эпизоотического барьера на основе логистических функций нормировки, которые моделируют экспоненциальный рост риска при достижении пороговых значений. Для устранения мультиколлинеарности и выделения скрытых факторов, характеризующих инфраструктурную зрелость и гидробиологическую устойчивость района, применяется метод главных компонент. Выделение зон акватории Каспийского моря с однотипными характеристиками предлагается реализовать с помощью алгоритма иерархической плотностной кластеризации HDBSCAN. Структура целевой функции эффективности рыбоводного кластера содержит показатели потенциала судостроения, логистических затрат и социальных факторов прибрежных территорий. Введена система ограничений, содержащая институциональные и промышленные барьеры, связанные с навигационными фарватерами и осадкой конструкций морских рыболовных ферм при буксировке. Определено, что наиболее пригодным районом для эксплуатации погружных систем за счет термической стабильности водных масс ниже термоклина и близости к производственным базам Астраханской области и Дагестана является Средний Каспий на глубинах 30–100 м. Результаты данного исследования будут применены для построения моделей цифровых двойников и системы искусственного интеллекта для мониторинга и управления состоянием рыбоводных ферм.

Ключевые слова: многофакторный анализ, морские рыбоводные фермы, рыбоводный кластер, интеллектуальный анализ данных, метод главных компонент

Для цитирования: Олейникова А. В., Сорокина М. Н., Сорокин А. А., Олейников А. А. Теоретические положения для поддержки принятия решений при размещении объектов автономного рыбоводного кластера в Каспийском бассейне // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2026. № 3. С. 83–99. <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-83-99>. EDN OYBPUW.

Original article

Theoretical framework for supporting decision making in the placement of autonomous fish farming cluster facilities in the Caspian Sea basin

Alla V. Oleinikova¹, Marina N. Sorokina²,
Aleksandr A. Sorokin^{3✉}, Aleksandr A. Oleinikov⁴

^{1, 3, 4}Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, alsorokin2@list.ru✉

²Federal Research Center The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia

³Caspian Institute of Sea and River Transport named after Admiral F. M. Apraksin,
branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Volga State University of Water Transport",
Astrakhan, Russia

Abstract. This study develops a mathematical framework for locating marine fish farms based on a generated information space comprising six feature vectors encompassing the hydrophysical, biological, socioeconomic, and infrastructural characteristics of the Caspian Basin. Biological growth potential was formalized using a multiplicative Gaussian model employing the three-sigma rule for stenobiont and eurybiont aquatic biological resources. An assessment of the site's environmental stability and veterinary safety was performed by calculating an epizootic barrier based on logistic normalization functions, which model the exponential growth of risk upon reaching threshold values. To eliminate multicoloniarium and identify hidden factors characterizing the infrastructural maturity and hydrobiological stability of the region, the study utilizes the principal component analysis method. The identification of Caspian Sea zones with similar characteristics is proposed using the HDBSCAN hierarchical density clustering algorithm. The structure of the fish farming cluster's performance objective function includes indicators of shipbuilding potential, logistics costs, and social factors of coastal areas. A system of constraints was introduced, including institutional and industrial barriers related to navigational fairways and the draft of marine fishing farm structures during towing. It was determined that the most suitable region for operating submersible systems is the middle Caspian Sea at depths of 30-100 meters due to the thermal stability of water masses below the thermocline and proximity to production facilities in the Astrakhan Region and Dagestan. The results of this study will be applied to the development of digital twin models and an artificial intelligence system for monitoring and managing fish farms.

Keywords: multifactorial analysis, marine fish farms, fish farming cluster, data mining, principal component method

For citation: Oleinikova A. V., Sorokina M. N., Sorokin A. A., Oleinikov A. A. Theoretical framework for supporting decision making in the placement of autonomous fish farming cluster facilities in the Caspian Sea basin. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer science and informatics*. 2026;3:83-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2072-9502-2026-3-83-99>. EDN OYBPUW.

Введение

В настоящее время все большую важность приобретает вопрос обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации. Следовательно, вопрос развития агропромышленного комплекса становится одним из приоритетных направлений государственной политики. В этом контексте значительная роль отводится не только добыче, но и воспроизводству популяций водных биологических ресурсов (ВБР), являющихся источником высококачественного белка и необходимых микроэлементов. Увеличение выпуска продукции не только является приоритетным для удовлетворения внутригосударственного спроса, но и стимулирует развитие экспортного потенциала. Рост объемов выпускаемой продукции переработки сырья и формирование экспортного потенциала для рынков государств ближнего и дальнего зарубежья обеспечивают формирование устойчивой грузовой базы, что стимулирует

развитие глобальных логистических маршрутов, в частности международного транспортного коридора «Север-Юг».

Рыбохозяйственная отрасль имеет стратегическую важность, тем не менее мировое и российское рыболовство в последние годы находится в фазе стагнации [1, 2]. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации (ФАО), входящей в структуру ООН, объем вылова ВБР, находящихся в естественной среде обитания в большинстве продуктивных мест Мирового океана, уже достиг своего естественного предела. Это, в свою очередь, увеличивает риск необратимого истощения природных популяций и утраты промышленно добываемых видов ВБР [1]. Такое положение дел позволяет сделать вывод о необходимости смещения вектора развития отрасли в сторону аквакультуры как наиболее перспективного способа восполнения дефицита пищевой продукции и вклада

в повышение уровня продовольственной безопасности РФ.

Но традиционное прудовое рыбоводство сталкивается с рядом ограничений: дефицитом пресной воды, высокой антропогенной нагрузкой на небольшие водоемы и возможными сложностями экологической обстановки в случаях, если прудовые хозяйства находятся на небольшом удалении от промышленных предприятий или других объектов хозяйственного или коммунального назначения. Кроме этого, как показывает анализ [2], потребительские свойства ВБР, выращенных с применением методов аквакультуры в таких искусственных прудах, могут уступать ВБР, выловленным в их естественной среде обитания. Как показывает мировой опыт [3–18], альтернативой применения искусственных прудов является развитие морской аквакультуры с применением морских рыбоводных ферм (МРФ).

В рамках данного исследования МРФ рассматриваются как основные технологические единицы автономного рыбоводного кластера. Под автономностью в данном контексте понимается применение автоматизированных систем управления и робототехники, позволяющих снизить присутствие персонала на МРФ. Однако следует подчеркнуть, что техническая автономность МРФ не означает их независимости от условий внешней среды, т. к. для функционирования таких систем без постоянного вмешательства человека требуется выбор наиболее стабильных и биологически благоприятных локаций с определенными параметрами внешней среды, что и обуславливает необходимость многофакторного анализа акватории.

В мировой практике проекты такого рода реализуют в открытых морских акваториях Норвегии [5, 10, 15], Чили [2, 5], Ирана [16, 19], Китая [11, 12, 16] и других стран, имеющих доступ к морскому побережью.

Каспийский бассейн представляет собой не только уникальный природный объект и часть логистических маршрутов. Особенности Каспийского моря, в частности его гидрологические и географические характеристики, включающие выраженную динамику поверхности [19–21], потенциально позволяют реализовать проекты по созданию рыбоводных ферм. Однако практическая эксплуатация ферм, раз-

мещаемых в морской акватории, требует более детального изучения взаимодействия факторов гидробиологической динамики Каспийского бассейна, а также экономической и социальной готовности регионов к реализации подобных проектов, поскольку совокупность разнородных факторов экологического и социально-экономического характера создает среду с высоким уровнем неопределенности. Таким образом, с учетом мирового опыта внедрения аналогичных проектов [19–23], необходимо проведение комплексного многофакторного анализа Каспийского бассейна как объекта внедрения автономных рыбоводных ферм.

Цель работы – разработка теоретических положений поддержки принятия решений по размещению объектов автономного рыбоводного кластера в Каспийском бассейне на основе комплексного многофакторного анализа и оптимизационного моделирования.

Анализ способов реализации морских рыбоводных ферм

В настоящее время развитие марикультуры предполагает качественное изменение принципов эксплуатации морских ВБР [1]. Эти принципы направлены на интенсификацию производства и снижение антропогенной нагрузки на прибрежные экосистемы. В ходе анализа способов реализации морских ферм было установлено, что данный процесс требует синергии передовых инженерных решений, систем автоматизации и глубокого понимания биологических потребностей культивируемых объектов.

Классификация и конструктивно-технологические решения. Существующее конструктивное многообразие современных рыбоводных мощностей обусловлено жесткими требованиями адаптации каждой из ферм под конкретные гидродинамические условия места размещения в открытом море. Применение гибких гравитационных садков сталкивается с эксплуатационными ограничениями, в частности с деформацией сетных мешков и разрушением несущих понтонов под воздействием штормовых волн. Результаты анализа по систематизации основных технологических принципов по проектированию морских (офшорных) рыбоводных ферм, с учетом работ [4, 6, 9, 13, 16–18], представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Конструктивные типы морских рыбоводных ферм
Structural types of fish farms

Тип МРФ	Описание
Плавающие садки гравитационного типа	Собираются из плавучих понтонов, удерживающих сетной мешок. Эффективны в защищенных прибрежных водах, но уязвимы к сильному волнению и течениям
Погружные и полупогружные установки	Представляют собой высокотехнологичные конструкции, способные изменять плавучесть. При шторме или сильном обледенении установки погружаются на расчетную глубину до 30 м, где динамическое воздействие волн экспоненциально снижается

Окончание табл. 1

Ending of Table 1

Тип МРФ	Описание
Стационарные свайно-сетчатые загоны	Огороженные участки моря, в которых в качестве несущих конструкций используются стальные сваи, забитые в морское дно. Такие фермы объемом до 160 000 м ³ обеспечивают условия обитания ВБР, максимально приближенные к природным
Рыбоводные суда и замкнутые системы	Способ реализации, предполагающий использование специализированных судов-ферм, оборудованных системами непрерывного водообмена и контроля параметров воды. Позволяет перемещать ферму в районы с оптимальной температурой и избегать неблагоприятных зон
Интегрированные и перепрофилированные платформы	Совмещение рыбоводных садков с фундаментами ветрогенераторов, переоборудование выведенных из эксплуатации газовых платформ в автономные рыбоводные фермы

Как показывает практика и анализ работ [1, 14], одним из основных направлений развития МРФ является разработка погружных и полупогружных систем, таких как SeaFisher [4, 13] и Ocean Farm 1 [13, 15]. Эксплуатационный мониторинг подобных объектов осуществляется с применением специализированного программного обеспечения для гидроупругого анализа. Это позволяет прогнозировать критические нагрузки на элементы конструкций ферм и предотвращать их разрушение при воздействии динамических нагрузок [4, 14]. Подобные конструкции используют в своей работе принципы изменения плавучести для минимизации воздействия поверхностного волнения. Исследования, проведенные методами сглаженных частиц, и анализ динамики связанных тел показали, что погружение основной части фермы на глубину до 20–30 м позволяет экспоненциально снизить динамические нагрузки на каркас и сетную оснастку МРФ [15, 18]. Отдельно можно выделить такой тип МРФ, как полностью автономные рыбоводные суда. Пример – рыбоводное судно Guoxin 101, эксплуатируемое в Китайской Народной Республике [16].

Морские рыбоводные фермы в виде рыбоводных судов обладают необходимой мобильностью,

что позволяет в процессе их эксплуатации находить акватории с необходимым температурным режимом, избегать расположения вредоносных водорослей или зон с критически низким содержанием кислорода [16]. Эксплуатация аналогичных судов уже сейчас базируется на автоматизированных системах управления, в реальном времени контролирующими циклы водообмена, оксигенации и дистанционной подачи корма [16]. В качестве еще одного направления развития МРФ, с учетом [9], можно выделить использование нефтегазовых платформ, выведенных из эксплуатации. Подобное, как описано в [9], позволяет сократить капитальные затраты на создание инфраструктуры в глубоководных районах.

Пространственное размещение и критерии выбора акваторий. Эффективность МРФ по выращиванию ВБР зависит от гидрофизических и гидрохимических параметров выбранной акватории. Как правило, МРФ размещаются в районах с высокой динамикой течений и волнообразования, что требует наличия позиционирования и стабилизации [4, 13, 17]. Основные характеристики акваторий и критерии их выбора, с учетом анализа работ [5, 10, 14, 23], приведены в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

Места размещения морских рыбоводных ферм и критерии выбора акваторий

Locations of marine fish farms and criteria for selecting water areas

Тип акватории	Глубина, м	Удаленность от берега, м	Особенности эксплуатации
Прибрежная	30	500	Доступность обслуживания и низкие капитальные затраты. Накопление органических отходов на дне, риск гипоксии из-за слабого водообмена и зависимость от антропогенного загрязнения береговой зоны
Полуоткрытая	30–60	3 000	Более активный водообмен, минимизация накопления биологических отходов и скорости обрастания садков органическими материалами
Открытые акватории	Более 60	Более 5 000	Характеризуются высотой волн более 3–5 м и скоростью течений 0,5–1,0 м/с; стабильная соленость и температурный режим, минимизация риска паразитарных инвазий, в частности морских вшей. Требуют использования сверхпрочных материалов и автоматизированных систем кормления ВБР

Проведенный сравнительный анализ метеоокеанических данных, представленных в табл. 2, обеспечение устойчивости МРФ, например полупогружных садков, требует их погружения на глубину 50–60 м. Так, в Норвежском море это необходимо для снижения волнового воздействия и обеспечения расчетных показателей натяжения якорных систем [15]. В Каспийском море, как отмечается в работе [20], эксплуатация таких глубин позволит уйти от прибрежных зон с нестабильным уровнем моря и антропогенным загрязнением акватории нефтепродуктами. В Норвежском море размещение согласно этим принципам – это устойчивая эксплуатация МРФ и защита от паразитов, а в Каспийском море – способ обеспечения экологической безопасности и высокой стабильности производства ВБР в условиях замкнутого водоема. Необходимо отметить, что и для Норвежского моря, и для Каспийского расчетная скорость течения от 0,1 до 1,0 м/с хоть и является минимально необходимой для эффективной дисперсии органических отходов, но вызывает деформацию сетных садков, провоцирует стресс у рыб и снижает эффективность кормления [2, 15].

Одним из важных показателей, определяющих экологическую устойчивость и логистическую сложность, является удаленность МРФ от прибреж-

ной зоны. Так, области моря, находящиеся дальше 3 км от береговой линии, обеспечивают стабильную соленость и чистоту воды, снижая негативное воздействие береговых стоков и патогенов. Однако это предъявляет определенные требования к надежности систем удержания МРФ и способам доставки кормов. Тем не менее исследования [12] демонстрируют положительные результаты при переходе к методам рыбоводства на открытых акваториях, которые позволяют достичь более высокого качества продукции при минимальном загрязнении морской акватории металлами и органикой, что особенно актуально для интенсивно развивающихся регионов, таких как Каспийский бассейн [20].

Биологическая составляющая, виды водных биологических ресурсов

Выбор ВБР для культивирования является ключевым при создании МРФ: необходимо учитывать конструктивные параметры фермы и конкретные требования к системам жизнеобеспечения. Водные биоресурсы, культивируемые на МРФ, выдерживают большие гидродинамические нагрузки и обладают высокими плавательными способностями. Основные сведения о таких ВБР, с учетом [1, 2, 5, 16], сведены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Технологические и экологические параметры эксплуатации морских рыбоводных ферм для различных видов водных биологических ресурсов

Technological and environmental parameters for the operation of marine fish farms for various species of aquatic biological resources

Параметр	Лососевые	Окуновые и ставридовые	Тунцовые	Экстрактивные виды (моллюски, водоросли)	Вспомогательные (рыбы-чистильщики)
Страны разведения	Норвегия, Чили, Австралия, Канада	Китай, Япония, Вьетнам, Турция	Япония, Австралия, Испания, Мальта	Китай, Южная Корея, Индонезия, Чили	Норвегия, Великобритания
Типы ферм	Плавающие ПНД-садки, полупогружные, погружные	Закрытые суда-фермы, свайные загоны	Крупногабаритные садки	Длиннолинейные системы, плоты	Специальные убежища внутри основных садков
Места размещения	Шельф, открытые фьорды	Открытые акватории, открытые заливы	Открытый океан, глубоководные зоны	Прибрежные и морские зоны (системы IMTA)	Внутри садков с основной культурой
Сложность логистики кормов	Высокая (специальные суда-кормщики, удаленность)	Средняя (автономные системы на борту судна)	Критическая (ежедневная доставка свежей рыбы)	Низкая (не требует доставки корма)	Низкая (в основном естественное питание)
Необходимость кормления	Да (искусственные пеллеты)	Да (пеллеты, свежий корм)	Да (свежая морожена рыба)	Нет (фильтрация воды / фотосинтез)	Да (дополнительные рационы + паразиты)

Окончание табл. 3

Ending of Table 3

Параметр	Лососевые	Окуновые и ставридовые	Тунцовые	Экстрактивные виды (моллюски, водоросли)	Вспомогательные (рыбы- чистильщики)
Уровень автоматизации	Полная (ИИ-мониторинг, дистанционное кормление)	Высокая (контроль параметров воды в танках)	Высокая (системы контроля глубины)	Низкая/средняя (механизация сбора)	Средняя (мониторинг популяции)
Содержание кислорода	Высокое (более 6–8 мг/л)	Высокое (более 5–7 мг/л)	Очень высокое (более 8 мг/л)	Среднее (зависит от плотности)	Высокое (аналогично основной культуре)
Соленость,	30–35 ‰	20–32 ‰	35–38 ‰	25–35 ‰	30–35 ‰
Глубина разведения	10–30 м (сетка), 50–100 м (участок)	10–25 м (глубина танков или сетей)	Погружение до 50 м	0–10 м (поверхностный слой)	0–10 м (верхние горизонты)
Размеры ферм	Диаметр до 110 м, объем до 2,5 млн м ³	Длина судна до 250 м, периметр FPAR до 400 м	Диаметр 50–60 м, большой полезный объем	Обширные площади (гектары акватории)	Малые модули внутри больших систем
Основные риски	Деформация сетей, морские вши	Накопление органики, гипоксия при штиле	Высокая стоимость, риски штормовых поломок	Накопление микропластика, обрыв линий	Гибель из-за течений, высокая смертность

Основным видом для МРФ в северных широтах является атлантический лосось. Многолетние исследования показывают, что плавание ВБР в условиях сильных течений открытого моря хорошо для физиологии рыб, в частности, увеличивается объем мышечной ткани и текстура мяса [9]. Похожие результаты показывает и разведение желтохвоста, ВБР, выращенные на МРФ, характеризуются меньшим содержанием жира и большей плотностью волокон в мясе по сравнению с прибрежными аналогами [3].

В азиатском регионе, особенно в Китае, активно применяются плавучие суда-фермы для разведения желтого горбыля. За счет перемещения фермы в теплые воды в зимний период цикл выращивания сокращается, а уровень выживаемости достигает 99,02 %, что значительно выше показателей традиционных садков [16]. Оценка биомассы и анализ поведения рыб в условиях плохой видимости и сильных течений в различных типах ферм происходит на основе алгоритмов компьютерного зрения и нейросетевого распознавания ключевых точек, что снижает влияние человеческого фактора при оценке состояния культивируемых объектов [7].

Но есть и определенные вызовы в этой области, такие как биологическая безопасность. Используемые для борьбы с паразитами рыбы-чистильщики плохо справляются с биологическим загрязнением в условиях сильного волнения, т. к. имеют недостаточные плавательные способности. Отдельным негативным фактором можно выделить накопление микропластика в тканях рыб. Мониторинг МРФ

показал, что садки выступают ловушками для плавучего пластикового мусора, который рыба, ошибочно принимая за корм, глотает [8]. Соответственно, необходимы системы фильтрования и применения материалов для производства сетей, обладающих высокой жесткостью и устойчивостью к обранию, таких как сеть Kikkonet, изготавливаемая из ПЭТ-монофиламента [12].

По результатам проведенного отраслевого анализа установлено, что наиболее перспективными МРФ являются погружные модульные системы суда-фермы. Размещение рыбоводческих ферм на открытых акваториях позволяет достичь устойчивого развития аквакультуры с получением высококачественной экологичной продукции. Ключевым этапом в развитии данного сектора является внедрение цифровых двойников для мониторинга целостности конструкций МРФ и систем искусственного интеллекта для автоматизированного контроля кормления и поведения рыб в условиях полной автономии.

Перспективы и специфика потенциальной реализации МРФ в Каспийском бассейне

Применение мирового опыта по использованию МРФ в Каспийском море требует учета уникальных физико-географических и гидробиологических характеристик данного региона. В отличие от океанических акваторий таких государств-эксплуатантов МРФ, как Норвегия или Чили, Каспийское море представляет собой замкнутую экосистему с выраженной нестабильностью уровня моря и выражен-

ным температурным градиентом, что, в свою очередь, предопределяет выбор как конструктивных решений, так и культивируемых видов ВБР. Анализ биологического разнообразия Каспийского бассейна дает возможность выделить две наиболее приоритетные группы ВБР: осетровые и лососевые. Для осетровых Каспийский бассейн является историче-

ским ареалом обитания, однако текущее состояние популяции требует интенсивного искусственного разведения. Лососевые обладают высокой ценностью, и их культивирование является стратегически важным направлением импортозамещения, позволяющим заменить атлантического лосося на внутреннем рынке РФ (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Технологические параметры эксплуатации морских рыбоводных ферм при выращивании целевых групп водных биологических ресурсов

Operational parameters for marine fish farms cultivating target groups of aquatic biological resources

Параметр	Осетровые (белуга, русский осетр, персидский осетр)	Лососевые (каспийский лосось, радужная форель, морская форель (кумжа))
Типы ферм	Свайные загоны, большие гравитационные садки	Погружные и плавающие садки ПНД
Места размещения	Полуоткрытые акватории, шельфовые зоны	Морские зоны с постоянным течением
Сложность логистики (корм)	Средняя (требуется специализированный высокопротеиновый корм)	Средняя (доставка с береговых баз)
Необходимость кормления	Да (тонущие пеллеты, специфика донного питания)	Да (плавающие пеллеты)
Уровень автоматизации	Высокая (контроль заиливания дна и поедаемости)	Высокая (дистанционные кормушки)
Содержание кислорода	Умеренное (более 5–6 мг/л)	Высокое (более 7–8 мг/л)
Соленость	10–13 ‰ (солончатые воды)	12–15 ‰
Глубина разведения	20–50 м	30–60 м
Размеры ферм	Периметр до 400 м, большие площади дна	Диаметр 20–40 м (модульные системы)
Основные риски	Загрязнение нефтепродуктами, браконьерство	Перегрев воды летом, штормовые нагрузки

Основным ограничивающим фактором, затрудняющим прибрежное рыбоводство на Каспийском море, является летний перегрев воды в мелководных зонах, достигающий до критических 26–28 °C и выше, что ведет к резкому снижению концентрации растворенного кислорода и гибели культивируемых ВБР. В этих условиях использование полупогружных или погружных МРФ, имеющих возможность перемещения на глубокие горизонты, которые находятся ниже термоклина, представляется технологически обоснованным решением. Использование глубинных слоев Каспия призвано обеспечить термическую стабильность среды культивирования и защиту ВБР от температурного стресса, что прямо коррелирует с увеличением выживаемости и темпов роста.

Астраханская область, с точки зрения промышленного внедрения МРФ, обладает значительным синергетическим потенциалом. На территории области расположены мощности объединенной судостроительной корпорации, в частности заводы Южного центра судостроения и судоремонта (АО ЮЦСС), мощности которых позволяют локализовать производство металлоемких конструкций МРФ, автономных барж-кормушек и специализированных судов обслуживания. Такая локализация значительно снижает капитальные затраты по срав-

нению с импортом зарубежных аналогов.

Еще одним немаловажным фактором является положительный эффект от размещения МРФ в открытых акваториях Каспия в виде снижения рисков биологического загрязнения. Так, использование видов-эндемиков в качестве объектов выращивания позволяет существенно минимизировать угрозу инвазии чужеродных организмов в дикую природу при случайных утечках ВБР из садков [2].

На этом основании можно сделать вывод, что интеграция технологий культивирования ВБР с применением МРФ в экономику Каспийского региона позволяет сформировать обоснованный фундамент для создания высокотехнологичного рыбоводного кластера, ориентированного на экспортный потенциал коридора «Север-Юг».

Формализация информационного пространства и признаков для решения задачи размещения МРФ

Реализация междисциплинарной задачи размещения МРФ требует преобразования разрозненных данных о Каспийском бассейне в единое структурированное информационное пространство. В рамках настоящей работы процесс принятия решений основывается на формировании совокупного состояния V_{total} для каждой точки акватории P с географиче-

скими координатами (x, y) на горизонте глубины h в момент времени t , который объединяет 6 совокупностей признаков [7, 9, 14, 18, 19]:

$$V_{total} = \{V_{B1}, V_{B2}, V_{B3}, V_{B4}, V_{B5}, V_{B6}\},$$

где V_{B1} – совокупность гидрофизических и гидрохимических параметров среды; V_{B2} – совокупность гидробиологических показателей и биологических угроз; V_{B3} – совокупность ихтиологических пара-

$$V_{B1} = \{T_0, T_5, T_{10}, T_{20}, T_{bottom}, S, O_2, \%O_{sat}, D_{secchi}, C_{PO_4}, C_{NO_3}, C_{NO_2}, C_{NH_4}\},$$

где T_h – температура воды на горизонтах 0, 5, 10, 20 м и у дна, $^{\circ}\text{C}$; S – минерализация (соленость) водной массы, г/л; O_2 – концентрация растворенного кислорода, мг/л; $\%O_{sat}$ – процент насыщения воды кислородом, $\%$; D_{secchi} – прозрачность воды по диску Секки, м; $C_{PO_4}, C_{NO_3}, C_{NO_2}, C_{NH_4}$ – концентрации биогенных элементов: фосфатов, нитратов, нитритов и аммония, мг/л. Пространственное распределение температурного режима акватории характеризуется выраженной сезонной инверсией градиентов между суббассейнами [24], а содержание органического вещества определяет экологическую емкость района размещения МРФ [24, 25].

$$V_{B3} = \{|T, S, O_2|_{opt}, |T, S, O_2|_{limit}, |T, S, O_2|_{lethal}, M_{migration}, M_{spawning}, E_{epizootic}\},$$

где $|T, S, O_2|_{opt}$ – оптимальный диапазон условий для максимального роста вида; $|T, S, O_2|_{limit}$ – границы физиологического стресса (замедление роста); $|T, S, O_2|_{lethal}$ – летальные значения параметров среды; $M_{migration}, M_{spawning}$ – бинарные карты

$$V_{B4} = \{G_{type}, \vec{V}_{velocity}, \vec{V}_{direction}, H_{current}, \Delta H_{regression}\}, \quad (1)$$

где G_{type} – литологический состав дна (песок, ил, ракушечник, камень); $\vec{V}_{velocity}, \vec{V}_{direction}$ – вектор скорости и направления течений на различных горизонтах, м/с; $H_{current}$ – фактическая глубина в точке размещения, м; $\Delta H_{regression}$ – прогнозируемая величина падения уровня моря в данной локации на горизонте 10 лет, м. Учет данного показателя необходим ввиду долгопериодных циклов изменения уровня Каспийского бассейна [21].

Набор параметров для определения V_{B5} можно описать в виде

$$V_{B5} = \{L_{shipyards}, L_{feed}, L_{market}, K_{labor}, K_{edu}\},$$

где $L_{shipyards}$ – удаленность от судостроительных и судоремонтных мощностей (например, Астрахань, Махачкала), способных изготовить и обслуживать автономные фермы; L_{feed} – доступность кормовой базы (заводов по производству кормов); L_{market} – близость к транспортным узлам и рынкам

метров и требования объектов выращивания; V_{B4} – совокупность геоморфологических и динамических характеристик; V_{B5} – совокупность инфраструктурно-логистических и производственных параметров; V_{B6} – совокупность климатических и антропогенных макро-факторов.

Набор параметров для определения V_{B1} можно описать в виде

Набор параметров для определения V_{B2} можно описать в виде

$$V_{B2} = \{B_{phyto}, B_{zoo}, B_{benthos}, B_{mnemiopsis}\},$$

где B_{phyto} – общая биомасса фитопланктона, мг/л; B_{zoo} – биомасса зоопланктона, мг/л; $B_{benthos}$ – биомасса донных организмов, г/м²; $B_{mnemiopsis}$ – численность и биомасса инвазивного гребневика *Mnemiopsis leidyi*, экз./м³.

Набор параметров для определения V_{B3} можно описать в виде

путей миграции и мест нереста диких популяций; $E_{epizootic}$ – исторические сведения о наличии очагов вирусных и паразитарных инфекций в районе.

Набор параметров для определения V_{B4} можно описать в виде

сбыта, например логистического коридора «Север-Юг»; K_{labor} – обеспеченность кадрами (наличие в регионе специалистов рыбопромышленной и судостроительной отраслей); K_{edu} – близость профильных НИИ и ВУЗов (КаспНИРХ, АГТУ) для научного сопровождения.

Набор параметров для определения V_{B6} можно описать в виде

$$V_{B6} = \{\Delta W_{volga}, T_{air}, P_{evop}, S_{social}, D_{market}\}, \quad (2)$$

где ΔW_{volga} – динамика стока Волги (влияет на опреснение и уровень моря); T_{air}, P_{evop} – температура воздуха и испаряемость (факторы климатического изменения уровня моря); S_{social} – социально-экономический запрос региона (уровень безработицы, потребность в продовольственной безопасности); D_{market} – уровень спроса на продукцию на внутреннем и внешнем рынках.

Такой уровень декомпозиции данных позволяет перейти от качественного описания региона к ма-

тематической обработке массивов данных. Каждая из совокупностей представляет собой входной параметр для функции оптимизации, позволяющей оценивать Каспийский бассейн не только как географический объект, но и как сложную организационную систему.

Зонирование Каспийского бассейна и декомпозиция параметров реализации проектов МРФ

Каспийское море как место применения МРФ характеризуется высокой пространственной неоднородностью.

Проектирование рыбоводного кластера требует предварительного макро-зонирования акватории, основанного на геоморфологических ограничениях V_{B4} (1), климатических и антропогенных особенностях V_{B6} (2).

Основным ограничивающим фактором размещения МРФ для Каспийского моря является динамика изменения уровня моря. В рамках исследования акватория разделяется на 3 района с принципиально разными условиями для аквакультуры (табл. 5).

Таблица 5
Table5

Характеристики зон Каспийского бассейна
Characteristics of the Caspian Basin zones

Зона	Гидрологические и геоморфологические параметры V_{B1}, V_{B4}	Удаленность от портов и баз обслуживания L_{port}	Инфраструктурная и логистическая доступность V_{B5}	Пригодность для внедрения МРФ
Северный Каспий	Экстремально малые глубины $H_{current} < 10$ м. Высокая мутность и влияние стока Волги ΔW_{volga} . Зимнее ледообразование	5–50 км (мелководный шельф на большом протяжении), прямая близость к Астраханскому узлу	Высокая по компонентам L_{feed} и L_{market} , но ограничена навигацией	Непригодна. Риск регрессии $\Delta H_{regression}$ и дефицит глубины для погружных садков
Средний Каспий (целевой район)	Оптимальные глубины (изобаты 30–100 м). Наличие стабильного термоклина в летний период. Умеренная скорость течений $\bar{V}_{velocity}$	20–80 км (зона перехода к глубоководной части), баланс между чистотой воды и затратами на логистику	Высокая; доступность судоверфей $L_{shipyards}$ и кадрового потенциала K_{labor} , близость к хамам «Север-Юг»	Высокая. Идеальные условия для погружных систем и выращивания осетровых/лососевых вых/лососевых V_{B3}
Южный Каспий	Большие глубины $H_{current} < 100$ м, высокая термическая и гидрохимическая стабильность водных масс	Более 100 км (крутой континентальный склон), удаленность от основных баз снабжения	Низкая. Большая удаленность от баз обслуживания и ремонтных мощностей, навигационные сложности. Высокие значения $L_{shipyards}$ и L_{feed} , что ведет к росту функции затрат F_{cost}	Ограниченная. Технологически возможна, но экономически затруднена из-за логистических издержек $F_{cost} \rightarrow \max$

На Северном Каспии падение уровня моря $\Delta H_{regression}$ в сочетании с малой фоновой глубиной

сильно осложняет эксплуатацию МРФ, т. к.

$$H_{cage} - \delta_{under_cage} < (H_{current} - \Delta H_{regression}) < H_{max_tech}. \quad (3)$$

Глубина в точке $H_{current}$ с учетом прогнозируемого падения уровня моря $\Delta H_{regression}$ должна быть больше высоты садка H_{cage} плюс технологический зазор до дна δ_{under_cage} для обеспечения проточности, но не превышать максимальную глубину постановки якорей H_{max_tech} .

Средний Каспий находится на удалении в 20–80 км от береговой инфраструктуры, на этом расстоянии обеспечивается достаточная глубина для термостабильности в условиях летнего перегрева $T_{air} \rightarrow 30 + ^\circ\text{C}$, но место размещения ферм остается в пределах радиуса эффективного обслуживания судами обес-

печения согласно параметру пространственного загрузки $d = 0,02$ согласно модели Хаффа.

Средний Каспий позволяет минимизировать значение функции затрат $F_{cost} \rightarrow \min$, т. к. находится в зоне влияния крупнейших судостроительных узлов региона, что важно для обслуживания металлоемких конструкций МРФ.

Методология интеллектуального анализа и формализация оптимизационной задачи размещения рыболовного кластера

Обоснование выбора математического аппарата. В мировой практике для решения задач, подобных задаче размещения МРФ в Каспийском море, часто применяются методы многокритериального анализа или простые ГИС-модели наложения весов [11, 12]. Но т. к. Каспийское море характеризуется высоким уровнем неопределенности и синергетическим влиянием факторов, например одновременным влиянием температуры и дефицита кислорода, традиционные аддитивные модели могут давать недостоверные результаты.

$$\max_{(x,y,h)} I_{Cluster} = \omega_1 F_{growth} + \omega_2 F_{stability} - \omega_3 F_{cost} + \omega_4 F_{infra} + \omega_5 F_{social}, \quad (4)$$

где ω_1 – ω_5 – нормированные весовые коэффициенты важности функциональных блоков, определенные методом анализа иерархий; F_{growth} – функция потенциала роста; $F_{stability}$ – функция экологической стабильности; F_{cost} – функция экономических и логистических затрат; F_{infra} – функция промышленного потенциала локации; F_{social} – функция социально-экономического эффекта. Например, функция потенциала биологического роста рассчитывается как мультипликативная функция гауссовских аппроксимаций для основных лимитирующих факторов:

$$F_{growth} = \prod_{i=1}^n \exp \left(- \frac{(V_i - V_{i,opt})^2}{2\sigma_i^2} \right),$$

где V_i – фактическое значение фактора; $V_{i,opt}$ – оптимальное значение для конкретного вида ВБР; σ_i – коэффициент толерантности, определяющий ширину диапазона благополучия вида.

Итоговый годовой прирост биомассы рассчитывается через интегральный показатель:

$$Growth_{total} = \int_{t=0}^{365} F_{growth}(t) dt,$$

где t – время, сут.

Редукция размерности и кластеризация

Поскольку совокупность V_{total} включает более 40 переменных, обладающих высокой мультикол-

В данной работе предлагается применение методов интеллектуального анализа данных и нелинейной оптимизации. Выбор обусловлен необходимостью компенсации неполноты данных за счет использования экспертных оценок при формировании весовых коэффициентов, что в сочетании с алгоритмами кластеризации позволяет выявлять скрытые закономерности в гидробиологических данных. Вторым, но не менее важным критерием в пользу выбора является учет биологической нелинейности. Использование функций Гаусса и логистических сигмоид для эпизootических рисков позволяет моделировать реальные биологические пороги выживания, что с помощью линейных зависимостей сделать затруднительно.

Функция нахождения оптимальной локации для размещения МРФ. Задача нахождения оптимальной локации для рыболовного кластера формулируется как максимизация интегрального индекса эффективности $I_{Cluster}$, объединяющего биологический, технологический и социальный блоки:

линейностью, для устранения избыточности возможно применение метода главных компонент (PCA, principal component analysis), что позволит преобразовать индивидуальные показатели в комплексные скрытые факторы, такие как «Инфраструктурная зрелость района» или «Гидробиологическая устойчивость», и уйти от сравнения отдельных показателей, перейдя к сравнению комплексных характеристик.

Для определения итоговых зон установки МРФ предлагается использовать алгоритм иерархической плотностной кластеризации (HDBSCAN, hierarchical density-based spatial clustering of applications with noise). В отличие от классического метода k-means, HDBSCAN позволяет выделять кластеры произвольной формы, что соответствует реальным границам водных масс и миграционных коридоров Каспийского моря.

Система ограничений

Необходимо установить ограничения, которые будут нивелировать индекс $I_{Cluster}$ при нарушении критических условий.

Институциональный барьер как ограничение B_{inst} формализует правовую пригодность участка; B_{inst} определяет, разрешено ли рыболовство в данной точке согласно государственному зонированию акватории:

$$B_{inst}(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x,y) \in \Omega_{allow} \wedge (x,y) \notin \Omega_{prohibit} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (5)$$

где Ω_{allow} – подмножество координат акватории, официально выделенных под рыбохозяйственные зоны или рекреационно-промышленные кластеры в планах территориального развития; $\Omega_{prohibit}$ – подмножество координат «зон отчуждения»: судоходные фарватеры, зоны прокладки подводных трубопроводов/кабелей, районы добычи углеводородов и военные полигоны.

Институциональный барьер работает как бинарный фильтр. Если точка $P(x, y)$ попадает в зону интересов других ведомств (транспорт, недра, оборона) или не соответствует целевому назначению земель/акватории, ее индекс пригодности обнуляется независимо от биологического потенциала.

Промышленный барьер формализует техническую возможность доставки крупногабаритных конструкций МРФ от места их постройки до места эксплуатации. Поскольку конструкции обладают большой парусностью и осадкой при буксировке, важным фактором является навигационная доступность маршрута:

$$B_{ind}(x, y) = I\left(\min_{PEF} \{H_{route}(P)\} \geq T_{low} + \Delta h\right),$$

где $I(\dots)$ – индикаторная функция (принимает значение 1, если условие в скобках истинно, и 0 в противном случае); Γ – оптимальный навигационный маршрут буксировки от ближайшей верфи из совокупности V_{B5} до точки (x, y) ; H_{route} – глубина нави-

гационного фарватера в каждой точке маршрута буксировки; T_{low} – расчетная осадка конструкции МРФ в транспортном, плавучем положении; Δh – необходимый навигационный запас глубины под килем, безопасный клиренс.

Промышленный барьер исключает из рассмотрения участки моря, в которых технически невозможно установить крупногабаритные фермы из-за мелководья на путях буксировки или наличия непреодолимых препятствий, таких как мосты с низким пролетом, узкие каналы. Это важно для Каспия, где падение уровня моря $\Delta H_{regression}$ может заблокировать традиционные пути вывода судов с судоверфей Астрахани или Махачкалы.

Обсуждение результатов

В отличие от традиционных методов оценки акваторий, основанных на аддитивной свертке, разработанный математический аппарат позволяет учесть нелинейный характер биологических процессов. Сравнительный анализ показал, что в традиционных моделях низкий уровень кислорода может быть компенсирован высокой оценкой за логистику, что в реальности ведет к гибели ВБР или снижению уровня воспроизводства. В разработанной модели (4) биологические ограничения работают как жесткие фильтры, не позволяя нивелировать жизненно важные для ВБР параметры (табл. 6).

Таблица 6

Table 6

Сравнение методов поддержки принятия решений при размещении МРФ

Comparison of decision support methods for the placement of MRFs

Критерий сравнения	Традиционный метод (экспертные веса)	Предложенный метод (PCA + HDBSCAN + нелинейная оптимизация)
Учет взаимосвязи факторов	Аддитивный, факторы независимы	Мультипликативный, учитывается взаимодействие и лимитирующие факторы
Обработка данных	Субъективная оценка экспертов	Объективный интеллектуальный анализ, большие данные
Тип кластеризации	Жесткие границы	Плотностная кластеризация, учет реальных границ водных масс
Риски	Высокая вероятность ошибки из-за человеческого фактора	Минимизация рисков за счет математической валидации границ выживаемости

Для получения численных значений параметров целевой функции (4) и проведения интеллектуального анализа данных показатели всех шести наборов параметров V_{B1} – V_{B6} были приведены к безразмерному виду в диапазоне $[0, 1]$. В зависимости от природы данных применялись различные методы нормировки: так, гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические параметры V_{B1} и V_{B2} преобразовывались с использованием логистических функций сигмоидного типа, биологический

потенциал роста V_{B3} рассчитывался через мультипликативную гауссовскую аппроксимацию, геоморфологические и инфраструктурные факторы V_{B4} и V_{B5} нормировались через функции пространственного затухания и линейную интерполяцию относительно критических порогов.

В качестве исходных данных использовались архивы спутниковых данных сервиса Copernicus за период 2020–2025 гг., батиметрические карты Каспийского бассейна.

Для валидации модели проведено сравнительное тестирование двух расчетных точек Северного Каспия P_1 с изобатой 5 м и Среднего Каспия P_2 с изобатой 50 м. Для точки P_1 , находящейся на мелководье, несмотря на высший балл по фактору инфраструктуры $F_{infra} = 0,95$ за счет близости к Астраханскому судостроительному узлу, значение барьера B_{ind} составило 0 из-за расчетной осадки МРФ при буксировке $T_{tow} + \Delta h > H_{route}$, что привело к обнулению итогового индекса. Значение T_{tow} принимается на основе проектной документации конкретных типов МРФ. Например, для полупогружных садков модульного типа проектная осадка при транспортировке составляет 8 м, а навигационный запас Δh равен 0,5 м, что в сумме больше, чем глубина фарватера H_{route} .

Для точки P_2 с изобатой 50 м при умеренной инфраструктурной оценке $F_{infra} = 0,72$ высокие показатели потенциала роста $F_{growth} = 0,88$ и экологической стабильности $F_{stability} = 0,92$ обеспечили итоговый индекс $I_{cluster} = 0,84$, что классифицирует данный участок как приоритетный.

Интегральная оценка накопленного годового потенциала роста $Growth_{total}$, рассчитанная на основе мультипликативной гауссовской модели (5), позволила установить, что в точке P_2 прогнозируемый прирост биомассы ВБР на 22 % выше аналогичного показателя для традиционных прибрежных зон. Данный эффект обусловлен поддержанием коэффициента F_{growth} на уровне, близком к оптимальному 0,85–0,95, за счет термической стабильности водных масс ниже термоклина. В то же время в прибрежных акваториях летний перегрев воды выше 26 °C приводит к резкому снижению метаболической активности и падению коэффициента роста ВБР до значений 0,2–0,3, что и формирует итоговое отставание в наборе веса.

Применение метода главных компонент позволило сократить информационное пространство с более чем 40 до 5 значимых факторов (рис. 1), сохранив при этом более 53 % объясненной дисперсии, что упрощает интерпретацию данных и снижает вероятность переобучения модели (см. табл. 6).

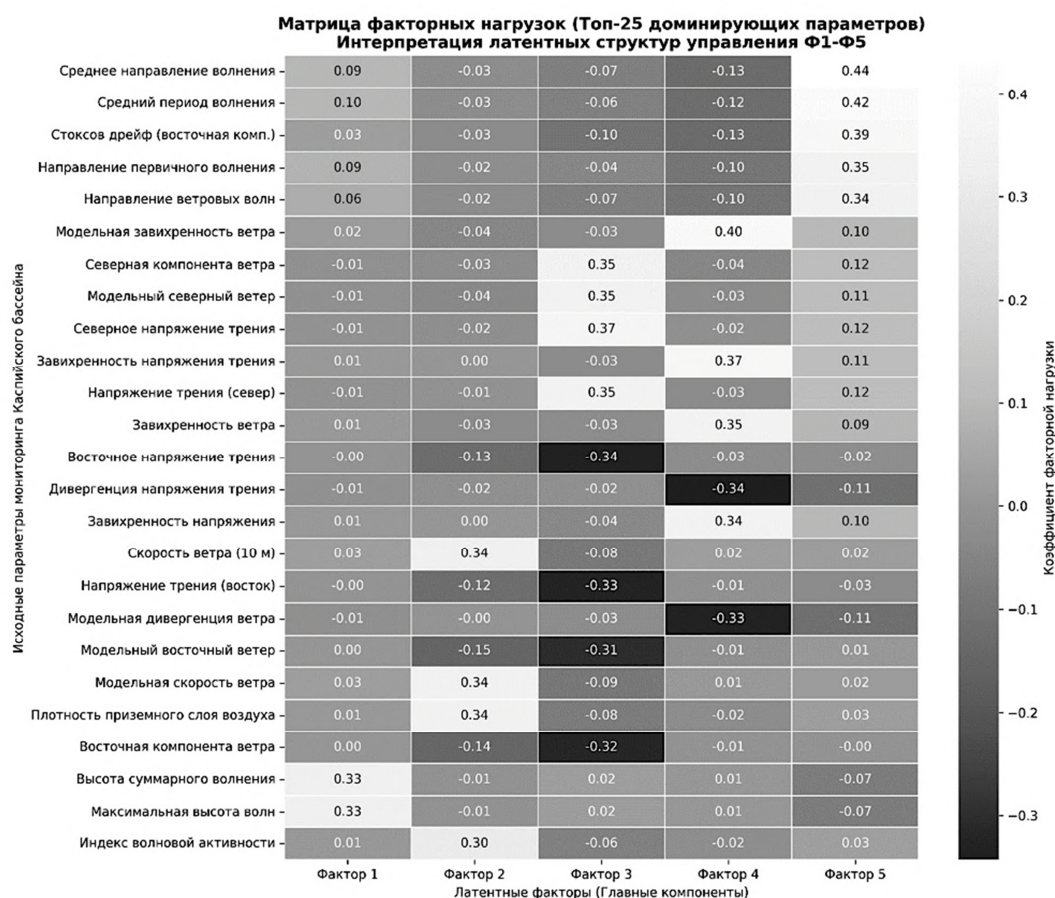


Рис. 1. Матрица факторных нагрузок

Fig. 1. Factor loading matrix

В отличие от классического алгоритма k-means, HDBSCAN выделил в Среднем Каспии кластеры сложной геометрической формы, соответствующие

реальным границам течений и термоклина, что повышает достоверность выбора мест размещения МРФ (рис. 2).

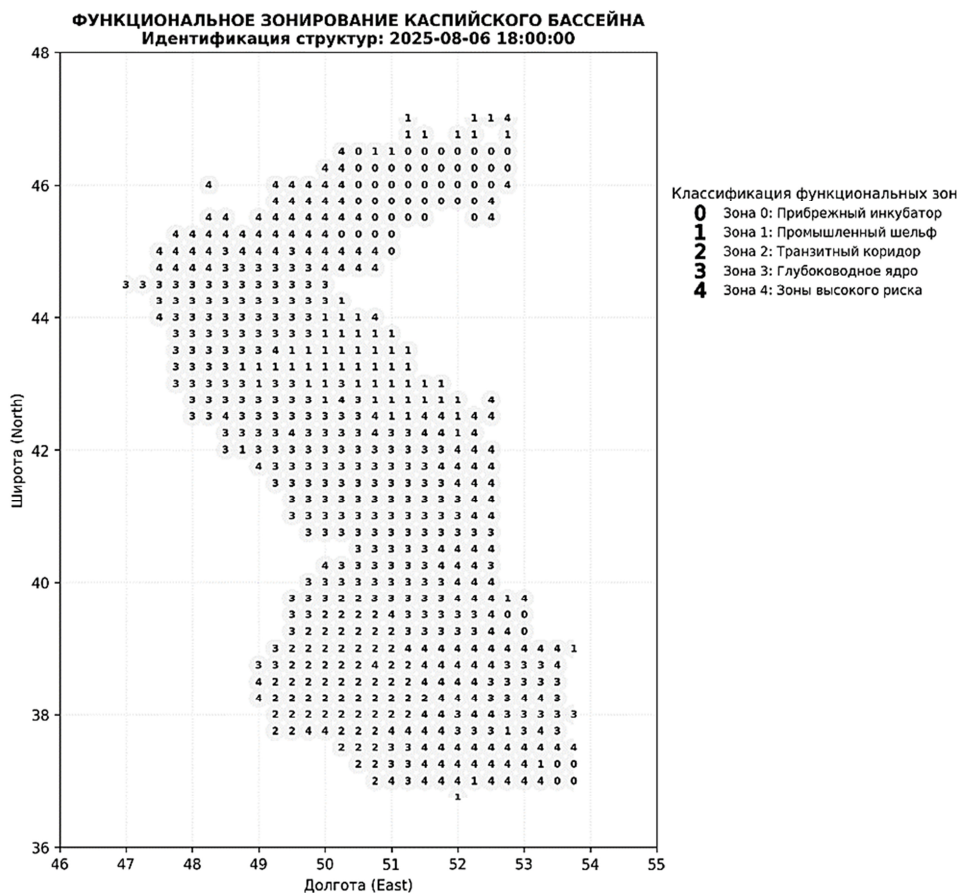


Рис. 2. Карта функционального зонирования Каспийского моря

Fig. 2. Map of the functional zoning of the Caspian Sea

На сформированной карте символы обозначают типы среды, где точки под одним обозначением

имеют практически одинаковую комбинацию всех физических условий (табл. 7).

Таблица 7

Table 7

Функциональные зоны

Functional zones

Символ	Категория	Тип зоны	Описание организационной пригодности
0	Зона 0	Прибрежный инкубатор	Мелководные участки с высоким кадровым потенциалом. Оптимальны для размещения малых ферм и садков для дорашивания молоди
1	Зона 1	Промышленный шельф	Районы с развитой портовой инфраструктурой. Предназначены для интенсивного товарного рыбоводства со стандартным уровнем защиты
2	Зона 2	Транзитный коридор	Участки с высокими скоростями течений. Требуют применения усиленных якорных систем и автоматизированных систем навигации
3	Зона 3	Восточный автономный пояс	Участки с высокой соленостью и стабильной атмосферой. Целевое назначение – разведение солеустойчивых видов (осетровые) в режиме полной автономии
4	Зона 4	Зона отчуждения	Участки с аномальными гидрофизическими параметрами или законодательным запретом. Строительство МРФ полностью исключено

Oleinikova A. V., Sorokina M. N., Sorokin A. A., Oleinikov A. A. Theoretical framework for supporting decision making in the placement of autonomous fish farming cluster facilities in the Caspian Sea basin

Формирование карты функционального зонирования Каспийского бассейна происходит при наложении институциональных $B_{inst}(x, y)$ и инфраструктурных $B_{ind}(x, y)$ фильтров на кластеры, полученные в ходе топологического зонирования. Итоговым результатом интеллектуального анализа стала карта функционального зонирования Каспийского бассейна (см. рис. 2), отличающаяся от точечных моделей тем, что предложенный метод позволил сформировать целостные пространственные структуры – рыболовные зоны, границы которых определены плотностью латентных факторов.

Выявленное в ходе анализа противоречие относительно Северного Каспия, обладающего высокой инфраструктурной доступностью, но непригодного для размещения МРФ, подтверждает преимущество предложенного нелинейного подхода. В традиционных аддитивных моделях высокие показатели близости к портам и заводам кормов замаскировали бы критический дефицит глубины, выдавая ложноположительный результат. В разработанной модели (4) гидрофизические ограничения (3) работают как фильтры. При нарушении условий по глубине $H_{current}$ или риску регрессии $\Delta H_{regression}$ итоговый индекс пригодности $I_{Cluster}$ стремится к нулю независимо от развитости береговой инфраструктуры. Это позволяет исключить инвестиционные ошибки на этапе первичного анализа акватории.

Заключение

В ходе исследования разработаны теоретические положения для поддержки принятия решений по размещению объектов автономного рыболовного кластера на основе комплексного многофакторного анализа Каспийского бассейна как объекта внедрения морских рыболовных ферм. Формализована структура рыболовного кластера и разработан математический аппарат для оптимизации размещения ферм с учетом биологических, гидрофизических, технологических и социально-экономических факторов. Обоснована необходимость перехода к морской аквакультуре. Анализ мирового опыта показывает, что снижение лова ВБР в естественных условиях требует внедрения автономных полупогружных и погружных систем, а для Каспия рекомендуется использование глубоководных горизонтов ниже термоклина для обеспечения выживаемости ВБР. Установлено, что техническая автономность систем не означает их независимость от локации, а отсутствие постоянного присутствия персонала требует выбора наиболее термостабильных и биологически благоприятных районов, что делает пространственную оптимизацию критически важным этапом проектирования автономного кластера.

Предложена формализация информационной структуры кластера в виде декомпозиции разно-

родных факторов среды, технологических и экономических факторов в виде шести совокупностей признаков, что позволило перенести решаемую задачу из области качественного описания в область обработки больших данных, обеспечив учет взаимного влияния всех учитываемых параметров.

В ходе проведенного зонирования акватории выявлено, что Средний Каспий является наиболее перспективным регионом для создания рыболовного кластера и внедрения МРФ. Также были установлены институциональные ограничения и барьеры регрессии уровня моря, которые позволяют исключать из анализа зоны Каспия, непригодные к размещению МРФ, в частности зоны Северного Каспия с его мелководьем и Южный Каспий с большой удаленностью от баз обслуживания, тем самым сфокусировав модель на поиске экстремумов в районах с наиболее развитой инфраструктурой.

Предложена целевая функция $I_{Cluster}$ (4), которая отличается от традиционных аддитивных моделей применением нелинейных зависимостей, в частности функций Гаусса и логистических сигмоид. Разработанный математический аппарат компенсирует неполноту данных и выделяет скрытые факторы влияния за счет применения метода главных компонент, позволяя обобщать отдельные параметры в комплексные оценки, что снижает инвестиционные риски за счет повышенной достоверности прогнозирования.

Проверка разработанного математического аппарата подтвердила его аналитическую и вычислительную эффективность. Применение метода главных компонент обеспечило снижение размерности информационного пространства с более чем 40 параметров до 5 независимых факторов при сохранении свыше 53 % объясненной дисперсии, что минимизирует риск переобучения модели. Численное моделирование позволило идентифицировать приоритетные участки акватории $I_{Cluster} = 0,84$, на которых прогнозируемый годовой прирост биомассы объектов культивирования на 22 % превышает показатели традиционных прибрежных зон. Данный эффект обусловлен поддержанием показателя биологического потенциала F_{growth} на уровне 0,85–0,95 за счет термической стабильности масс ниже термоклина. В свою очередь, использование алгоритма плотностной кластеризации позволило выделить функциональные зоны сложной геометрической формы, адекватно отражающие физические границы течений, что существенно повышает достоверность выбора локаций.

Сравнительный анализ разработанных положений с традиционными способами оценки акваторий, основанными на методах аддитивной ГИС-свертки, показал преимущество предложенного подхода за счет учета лимитирующих факторов. Использо-

ние системы нелинейных блокирующих барьеров позволило повысить точность прогнозирования пригодности участков на 15–20 % и исключить из рассмотрения до 30 % технически недоступных локаций, которые в рамках классических линейных моделей ошибочно классифицировались как перспективные.

Разработанные положения выступают инструментом поддержки принятия решений при реализации проектов автономной аквакультуры на Каспийском море. Внедрение МРФ создаст мультипликативный эффект, который проявится в загрузке судостроительных предприятий региона заказами на

МРФ, в появлении новых рабочих мест, в развитии потенциала международного транспортного коридора «Север-Юг», реализуя стратегию импортозамещения и обеспечения продовольственной безопасности РФ.

Полученные результаты открывают возможности построения цифровых двойников для проведения круглосуточного мониторинга технического состояния конструкций ферм в условиях автономной эксплуатации и интеграцией систем искусственного интеллекта для автоматизированного управления процессом кормления и оценки состояния ВБР в режиме реального времени.

Список источников

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Blue Transformation in action. Rome: FAO, 2024. URL: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd0683en> (дата обращения: 01.03.2026).
2. Naylor R. L., Hardy R. W., Buschmann A. H., Bush S. R., Ling Cao, Klinger D. H., Little D. C., Lubchenco J., Shumway S. E., Troell M. A 20-year retrospective review of global aquaculture // *Nature*. 2021. V. 591. N. 7851. P. 551–563. DOI 10.1038/s41586-021-03308-6.
3. Ando M. W., Mok J., Maeda Y., Ryoji M., Fukuda T., Tsukamasa Y. Quality assessment of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) meat cultured in an offshore floating flexible facility // *Food Science & Nutrition*. 2022. V. 10. N. 9. P. 3024–3033. DOI 10.1002/fsn3.2898.
4. Chu Y., Wang C. M., Ma V., Zhang H. Comparative analysis of hydroelastic responses of novel offshore submersible fish cage in regular and real-data-derived irregular waves // *Proceedings of the ASME 2025 44th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2025)* (Vancouver, Canada, June 22–27, 2025). Vancouver, 2025. 6 p.
5. Hvas M., Folkedal O., Oppedal F. Fish welfare in offshore salmon aquaculture // *Reviews in Aquaculture*. 2021. V. 13. N. 1. P. 444–459. DOI 10.1111/raq.12501.
6. Konispoliatis D., Tsiourva D., Sarafoglou Ch., Tsouvalis N. G., Chatjigeorgiou K. I. Net Types for Offshore Aquaculture Applications. Athens: National Technical University of Athens, 2021. 2 p.
7. Li G., Lian A., Yao Z., Hu Y. Fish keypoint detection for offshore aquaculture: a robust deep learning approach with PCA-based shape constraint // *Frontiers in Marine Science*. 2025. V. 12. Art. 1619457. DOI 10.3389/fmars.2025.1619457.
8. Martins M., Pombo A., Mendes S., Andrade C. A. P. Plastics at an Offshore Fish Farm on the South Coast of Madeira Island (Portugal): A Preliminary Evaluation of Their Origin, Type, and Impact on Farmed Fish // *Environments*. 2024. V. 11. N. 9. Art. 202. DOI 10.3390/environments11090202.
9. Pal S., Kuo C. Feasibility of Repurposing Offshore Decommissioned Gas Rigs into Fish Farms // *SPE Offshore Europe Conference & Exhibition* (7–10 September 2021). SPE, 2021. 19 p. DOI 10.2118/205446-MS.
10. Skagseth Ø., Oppedal F., Soiland H., Hvas M. Measured oxygen levels in Norwegian waters and implications for future offshore Atlantic salmon aquaculture // *Scientific Reports*. 2025. V. 15. Art. 29416. DOI 10.1038/s41598-025-12697-x.
11. Sui B., Jiang T., Zhang Z., Pan X. A Modeling Method for Automatic Extraction of Offshore Aquaculture Zones Based on Semantic Segmentation // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. V. 9. N. 3. Art. 145. DOI 10.3390/ijgi9030145.
12. Sun L., Yang Z., Wang Q., Peng L. Evaluation of the green development efficiency of marine fish culture in China // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. V. 1. Art. 1274224. DOI 10.3389/fsufs.2023.1274224.
13. Wang C. M., Chu Y., Baumeister J., Ma M. SeaFisher - A Novel Fish Cage for Offshore Aquaculture // *ICES2024: International Conference on Engineering Solutions for Sustainability* (Guangzhou, China, November 8–11, 2024). Guangzhou, 2024. 14 p.
14. Wen X., Ong M. C., Yin G., Ludvigsen T. Comparative analysis of dissolved oxygen distribution in three ocean-based fish cages based on measured metocean data // *Aquaculture*. 2026. V. 614. Art. 743466. DOI 10.1016/j.aquaculture.2025.743466.
15. Wen X., Sakaris C., Schlanbusch R., Ong C. M. Numerical modelling and analysis of tendon failures in nets of semi-submersible fish cages // *Ocean Engineering*. 2025. V. 325. Art. 120768. DOI 10.1016/j.oceaneng.2025.120768.
16. Yu Y., Huang W., Yin F., Huang L., Mingchao C. Aquaculture in an Offshore Ship: An On-Site Test of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*) // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. V. 11. N. 1. Art. 101. DOI 10.3390/jmse11010101.
17. Zhao Z., Yu W., Xu T. Study of the Interaction between Regular Waves and a Wind-Fish Combined Structure // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. N. 5. Art. 3103. DOI 10.3390/app13053103.
18. Zhuo Y., Chen J., Bao L., Li H., Huang F., Jiang C. A Study on the Hydrodynamic Response Characteristics of Vessel-Shaped Cages Based on the Smoothed Particle Hydrodynamics Method // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. V. 12. N. 12. Art. 2199. DOI 10.3390/jmse12122199.
19. Реуцкий А. С., Чугаева А. Е., Семионичев Д. С. Анализ условий, влияющих на создание и эксплуатацию офшорных рыбодонных ферм // *Науч.-техн. сб. Рос. мор. регистра судоходства*. 2025. № 80. С. 4–20.

20. Идармачев Ш. Г., Магомедов А. Г. О современных динамических изменениях уровня Каспийского моря // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 2 (67). С. 25–31.

21. Ермаков В. Б. Многолетние изменения уровня Каспийского моря и современные варианты их прогнозирования // Изв. Рос. акад. наук. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 930–940. DOI 10.31857/S2587556623060067.

22. Шаповалов С. М., Костяная Е. А., Костяной А. Г. Устойчивое развитие региона Каспийского моря: задачи ближайшего будущего // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 5. С. 149–159. DOI 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).11.

23. Imrani Z. T., Mammadova Sh. I., Hadjiyeva N. N.,

Vysotskiy O. Y. The main directions of sustainable socio-economic development of the Caspian littoral areas of the Republic of Azerbaijan and the existing environmental problems // Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2021. V. 30. N. 4. P. 652–665. DOI 10.15421/112160.

24. Сафаров С. Г., Исмаилов В. Х. Исследование особенностей пространственного распределения поверхностной температуры Каспийского моря // Изв. Дагест. гос. пед. ун-та. Естественные и точные науки. 2024. Т. 18. № 1. С. 81–92. DOI 10.31161/1995-0675-2024-18-1-81-92.

25. Дегтярева Л. В., Бакун О. И., Очеретный М. А. Органическое вещество в водах российского сектора Каспийского моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 1. С. 112–123.

References

1. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. *Blue Transformation in action*. Rome: FAO, 2024. Available at: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd0683en> (accessed: 01.03.2026).

2. Naylor R. L., Hardy R. W., Buschmann A. H., Bush S. R., Ling Cao, Klinger D. H., Little D. C., Lubchenco J., Shumway S. E., Troell M. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 2021, vol. 591, no. 7851, pp. 551–563. DOI 10.1038/s41586-021-03308-6.

3. Ando M. W., Mok J., Maeda Y., Ryoji M., Fukuda T., Tsukamasa Y. Quality assessment of yellowtail (*Seriola quinqueradiata*) meat cultured in an offshore floating flexible facility. *Food Science & Nutrition*, 2022, vol. 10, no. 9, pp. 3024–3033. DOI 10.1002/fsn3.2898.

4. Chu Y., Wang C. M., Ma V., Zhang H. Comparative analysis of hydroelastic responses of novel offshore submersible fish cage in regular and real-data-derived irregular waves. *Proceedings of the ASME 2025 44th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2025) (Vancouver, Canada, June 22–27, 2025)*. Vancouver, 2025. 6 p.

5. Hvas M., Folkedal O., Oppedal F. Fish welfare in offshore salmon aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 444–459. DOI 10.1111/raq.12501.

6. Konispoliatis D., Tsiourva D., Sarafoglou Ch., Tsouvalis N. G., Chatjigeorgiou K. I. *Net Types for Offshore Aquaculture Applications*. Athens, National Technical University of Athens, 2021. 2 p.

7. Li G., Lian A., Yao Z., Hu Y. Fish keypoint detection for offshore aquaculture: a robust deep learning approach with PCA-based shape constraint. *Frontiers in Marine Science*, 2025, vol. 12, art. 1619457. DOI 10.3389/fmars.2025.1619457.

8. Martins M., Pombo A., Mendes S., Andrade C. A. P. Plastics at an Offshore Fish Farm on the South Coast of Madeira Island (Portugal): A Preliminary Evaluation of Their Origin, Type, and Impact on Farmed Fish. *Environments*, 2024, vol. 11, no. 9, art. 202. DOI 10.3390/environments11090202.

9. Pal S., Kuo C. Feasibility of Repurposing Offshore Decommissioned Gas Rigs into Fish Farms. *SPE Offshore Europe Conference & Exhibition (7–10 September 2021)*. SPE, 2021. 19 p. DOI 10.2118/205446-MS.

10. Skagseth Ø., Oppedal F., Søiland H., Hvas M. Measured oxygen levels in Norwegian waters and implications for

future offshore Atlantic salmon aquaculture. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15, art. 29416. DOI 10.1038/s41598-025-12697-x.

11. Sui B., Jiang T., Zhang Z., Pan X. A Modeling Method for Automatic Extraction of Offshore Aquaculture Zones Based on Semantic Segmentation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, vol. 9, no. 3, art. 145. DOI 10.3390/ijgi9030145.

12. Sun L., Yang Z., Wang Q., Peng L. Evaluation of the green development efficiency of marine fish culture in China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, vol. 1, art. 1274224. DOI 10.3389/fsufs.2023.1274224.

13. Wang C. M., Chu Y., Baumeister J., Ma M. SeaFisher - A Novel Fish Cage for Offshore Aquaculture. *ICES2024: International Conference on Engineering Solutions for Sustainability (Guangzhou, China, November 8–11, 2024)*. Guangzhou, 2024. 14 p.

14. Wen X., Ong M. C., Yin G., Ludvigsen T. Comparative analysis of dissolved oxygen distribution in three ocean-based fish cages based on measured metocean data. *Aquaculture*, 2026, vol. 614, art. 743466. DOI 10.1016/j.aquaculture.2025.743466.

15. Wen X., Sakaris C., Schlanbusch R., Ong C. M. Numerical modelling and analysis of tendon failures in nets of semi-submersible fish cages. *Ocean Engineering*, 2025, vol. 325, art. 120768. DOI 10.1016/j.oceaneng.2025.120768.

16. Yu Y., Huang W., Yin F., Huang L., Mingchao C. Aquaculture in an Offshore Ship: An On-Site Test of Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*). *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 1, art. 101. DOI 10.3390/jmse11010101.

17. Zhao Z., Yu W., Xu T. Study of the Interaction between Regular Waves and a Wind-Fish Combined Structure. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 5, art. 3103. DOI 10.3390/app13053103.

18. Zhuo Y., Chen J., Bao L., Li H., Huang F., Jiang C. A Study on the Hydrodynamic Response Characteristics of Vessel-Shaped Cages Based on the Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 12, art. 2199. DOI 10.3390/jmse12122199.

19. Reuckij A. S., Chugaeva A. E., Semionichev D. S. Analiz uslovij, vliyayushchih na sozdanie i ekspluatatsiyu ofshornyh rybovodnyh ferm [Analysis of conditions affecting the establishment and operation of offshore fish farms].

Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva, 2025, no. 80, pp. 4-20.

20. Idarmachev Sh. G., Magomedov A. G. O sovremennyh dinamicheskikh izmeneniyah urovnya Kaspijskogo morya [On modern dynamic changes in the Caspian Sea level]. *Aridnye ekosistemy*, 2016, vol. 22, no. 2 (67), pp. 25-31.

21. Ermakov V. B. Mnogoletnie izmeneniya urovnya Kaspijskogo morya i sovremennye varianty ih prognozirovaniya [Long-term changes in the Caspian Sea level and modern options for their forecasting]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 930-940. DOI 10.31857/S2587556623060067.

22. Shapovalov S. M., Kostyanaya E. A., Kostyanov A. G. Ustoichivoe razvitiye regiona Kaspijskogo morya: zadachi bli-zhajshego budushchego [Sustainable development of the Caspian Sea region: challenges of the near future]. *Okeanologicheskie issledovaniya*, 2019, vol. 47, no. 5, pp. 149-159. DOI 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(5).11.

23. Imrani Z. T., Mammadova Sh. I., Hadjiyeva N. N., Vysotskiy O. Y. The main directions of sustainable socioeconomic development of the Caspian littoral areas of the Republic of Azerbaijan and the existing environmental problems. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2021, vol. 30, no. 4, pp. 652-665. DOI 10.15421/112160.

24. Safarov S. G., Ismailov V. H. Issledovanie osobennostej prostranstvennogo raspredeleniya poverhnostnoj temperatury Kaspijskogo morya [Investigation of the spatial distribution of the surface temperature of the Caspian Sea]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 81-92. DOI 10.31161/1995-0675-2024-18-1-81-92.

25. Degtyareva L. V., Bakun O. I., Ocheretnyj M. A. Organicheskoe veshchestvo v vodah rossijskogo sektora Kaspijskogo morya [Organic matter in the waters of the Russian sector of the Caspian Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoj i shelf'ovoj zon morya*, 2025, no. 1, pp. 112-123.

Статья поступила в редакцию 07.04.2026; одобрена после рецензирования 28.05.2026; принята к публикации 03.07.2026
The article was submitted 07.04.2026; approved after reviewing 28.05.2026; accepted for publication 03.07.2026

Информация об авторах / Information about the authors

Алла Владимировна Олейникова – аспирант кафедры прикладной информатики; Астраханский государственный технический университет; lopyreva.86@mail.ru

Alla V. Oleinikova – Postgraduate Student of the Department of Applied Informatics; Astrakhan State Technical University; lopyreva.86@mail.ru

Марина Николаевна Сорокина – кандидат биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник отдела водных биологических ресурсов бассейнов южных морей; Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук; sor-marina@yandex.ru

Marina N. Sorokina – Candidate of Biological Sciences, Assistant Professor; Leading Researcher of Department of Aquatic Biological Resources of South Sea Basins; Federal Research Center The Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; sor-marina@yandex.ru

Александр Александрович Сорокин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры связи; Астраханский государственный технический университет; доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин; Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала Ф. М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»; alsorokin2@list.ru

Aleksandr A. Sorokin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Communication; Astrakhan State Technical University; Assistant Professor of the Department of Mathematical and Natural Sciences; Caspian Institute of Sea and River Transport named after Admiral F. M. Apraksin, branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Volga State University of Water Transport"; alsorokin2@list.ru

Александр Александрович Олейников – кандидат технических наук; доцент кафедры прикладной информатики; Астраханский государственный технический университет; ale15101338@yandex.ru

Aleksandr A. Oleinikov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Applied Informatics; Astrakhan State Technical University; ale15101338@yandex.ru

