

Баяндин Максим Евгеньевич, студент 3 курса бакалавриата, Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ), г. Москва

БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ПАТОГЕНЫ РЫБ В АКВАКУЛЬТУРЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ВАКЦИНОПРОФИЛАКТИКЕ

Аннотация

В статье рассмотрены ведущие бактериальные патогены культивируемых рыб (*Aeromonas salmonicida*, *A. hydrophila*, *Vibrio anguillarum*, *Yersinia ruckeri*, *Piscirickettsia salmonis*, *Streptococcus iniae*, *Flavobacterium columnare*) с привязкой к конкретным случаям хозяйственного ущерба и задокументированным примерам применения вакцин в России и мире. Выполнен сравнительный разбор трех способов доставки вакцинного антигена – парентерального, погружного и кормового – по критериям показателя относительной выживаемости (RPS), стрессовой нагрузки и себестоимости. Охарактеризована разработанная в ФГБУ «ВНИИЗЖ» и «ВГНКИ» первая отечественная шестикомпонентная инактивированная вакцина для лососевых, испытанная на 5 млн особей. Показано, что массовая иммунизация лосося в Норвегии позволила сократить применение антибиотиков более чем на 99%.

Ключевые слова: промышленное рыбоводство, вакцинация рыб, бактериальные инфекции, фурункулез, аэромоноз, вибриоз, иммунопрофилактика, относительная выживаемость (RPS).

Keywords: industrial fish farming, fish vaccination, bacterial infections, furunculosis, aeromonosis, vibriosis, immunoprophylaxis, relative survival (RPS).

1. ВВЕДЕНИЕ

Промышленное разведение водных гидробионтов превратилось в одну из наиболее динамично расширяющихся подотраслей мирового

агропродовольственного комплекса. Согласно данным последнего доклада ФАО о состоянии мирового рыбного хозяйства и аквакультуры (SOFIA-2024), суммарный выпуск продукции рыбоводства в 2022 году достиг 223,2 млн тонн, превысив половину совокупного объема гидробионтов, поступающих на потребительские рынки [6]. Производство аквакультурной рыбы в России по итогам 2023 года составило 402 тыс. тонн, увеличившись за год на 4,8%; определяющий вклад вносят лососевые (36%) и карповые (37%) [9].

Вместе с тем форсированная интенсификация производства неизбежно обостряет эпизоотические риски. Бактериальные инфекции при вспышках уничтожают от 10 до 100% стада [1, 2], а совокупные мировые потери аквакультуры от болезней оцениваются приблизительно в 6 млрд долларов в год [1]. Длительно практиковавшаяся антибиотикотерапия утрачивает эффективность ввиду нарастания резистентности микроорганизмов и запретов регуляторов на остаточные количества препаратов в продукции [8]. Классической иллюстрацией альтернативного пути служит норвежское лососеводство: масштабное внедрение вакцин против *Aeromonas salmonicida* позволило с начала 1990-х годов сократить потребление антибиотиков в отрасли более чем на 99% при одновременном многократном росте объемов производства [10].

Цель настоящей работы состоит в систематизации сведений о ключевых бактериальных возбудителях заболеваний культивируемых рыб с анализом задокументированных случаев хозяйственного ущерба, а также в критическом разборе имеющихся вакцинных решений и способов их введения применительно к условиям отечественной и мировой аквакультуры.

2. БАКТЕРИАЛЬНЫЕ ПАТОГЕНЫ РЫБ: ХАРАКТЕРИСТИКА И ЗАДОКУМЕНТИРОВАННЫЙ УЩЕРБ

2.1. *Aeromonas salmonicida* - фурункулез лососевых

Aeromonas salmonicida - неподвижная грамотрицательная бактерия семейства *Aeromonadaceae* - является возбудителем фурункулеза, характеризующегося деструктивным поражением мышечной ткани,

патологией паренхиматозных органов и высокой летальностью. Норвегия в 1980-е годы понесла колоссальные убытки: тысячи садковых предприятий оказались охвачены эпизоотией, что вынудило индустрию ежегодно расходовать до 50 метрических тонн антибактериальных средств [10]. Считавшаяся ранее неосуществимой разработка инактивированных масляных вакцин к рубежу 1990-х годов позволила обрушить этот показатель до менее 1 тонны в год [10]. По актуальным данным Норвежского института общественного здравоохранения, в 2024 году весь сектор аквакультуры Норвегии израсходовал лишь 741 кг антибиотиков – в 475 раз меньше, чем конкурирующее Чили [5].

2.2. *Aeromonas hydrophila* и аэромоноз карповых

Под собирательным понятием «аэромоноз» (синонимы: краснуха карпов, геморрагическая септицемия) объединены инфекции, вызываемые подвижными видами рода *Aeromonas* - прежде всего *A. hydrophila*, *A. punctata* и *A. sobria*. Клинически болезнь проявляется воспалением покровов, изъязвлением, взъерошиванием чешуи и некрозом внутренних органов. На территории Российской Федерации болезнь регулярно регистрируется в прудовых карповых хозяйствах Брянской, Смоленской и Калужской областей, Краснодарского края [8]. При неблагоприятных условиях падеж молоди достигает 70-100% [1, 2]. Ветеринарные правила борьбы с аэромонозом закреплены Приказом Минсельхоза России от 14.04.2020 N 196 [8]. Специфическую профилактику обеспечивает разработанная ВНИИПРХ совместно с Карельским научным центром РАН вакцина ВЮС-2, показавшая высокие протективные свойства в лабораторных и производственных испытаниях [2].

2.3. *Vibrio anguillarum* и вибриоз

Vibrio anguillarum - грамотрицательная галофильная бактерия семейства *Vibrionaceae* - вызывает геморрагическую септицемию морских и проходных рыб. Патоген был описан еще в 1909 году Бергманном как возбудитель «красной чумы угрей»; первые отечественные исследования вибриоза рыб

Каспийского моря выполнены А.Ф. Вылегжаниным в 1958-1973 гг. [2]. В настоящее время заболеваемость зафиксирована в Балтийском и Белом морях [2]. Для практической иммунизации радужной форели в карельском СПК «РК Гридино» в мае 2007 года экспериментальная серия вакцины была введена иммерсионным методом 50 тыс. особей навеской 220 г; экспозиция составила 30 минут при температуре воды 8 °С с принудительной аэрацией [2]. В 1976 году в США была зарегистрирована первая в истории коммерческая лицензированная вакцина для рыб – именно против *V. anguillarum* [7].

2.4. *Yersinia ruckeri* и болезнь красного рта (ERM)

Yersinia ruckeri из семейства *Yersiniaceae* провоцирует энтерическую болезнь красного рта, широко распространенную среди радужной форели *Oncorhynchus mykiss* в Европе и Северной Америке. При высокой плотности посадки без вакцинации гибель стада достигает 30-40%. Коммерческий погружной препарат AquaVac ERM (MSD Animal Health) рассчитан на обработку молоди от 1 г: кратковременное (около 30 секунд) помещение в раствор при пропускной способности свыше 100 тыс. особей в час [5]. В ряде скандинавских хозяйств данная процедура включена в обязательные производственные протоколы.

2.5. *Piscirickettsia salmonis* и писцирикеттсиоз (SRS)

Piscirickettsia salmonis - факультативно внутриклеточный грамотрицательный патоген класса *Gamma*proteobacteria - вызывает рикеттсиозную септицемию лососевых. Чилийская аквакультура несет колоссальные потери: ежегодный ущерб оценивается в 300-700 млн долларов, а затраты на контроль SRS поглощают 50-80% всего антибиотического арсенала страны (около 350 тонн в 2024 году) [5, 10]. Имеющиеся инактивированные инъекционные препараты с масляным адъювантом формируют лишь частичную защиту (RPS 40-60%), что служит стимулом для поиска новых конструкций вакцин [5].

2.6. *Streptococcus iniae* и стрептококкоз

Streptococcus iniae и *S. agalactiae* из семейства Streptococcaceae являются ведущими возбудителями стрептококкоза тилляпии *Oreochromis niloticus* и морского окуня *Dicentrarchus labrax* в хозяйствах Юго-Восточной Азии и Ближнего Востока. Летальность при острой форме достигает 50-75% в течение нескольких суток. *S. iniae* обладает зоонозным потенциалом: описаны случаи инфицирования персонала при разделке больной рыбы. Инактивированные парентеральные вакцины применяются в Израиле, Малайзии и Индонезии, однако гетерогенность серовариантов затрудняет создание универсального препарата [1, 5].

2.7. *Flavobacterium columnare* и столбчатка (*columnaris disease*)

Flavobacterium columnare из семейства Flavobacteriaceae активно размножается при 25-37 °С, формируя характерные нитчатые колонии на покровах и жабрах. Основной удар приходится на сомоводство штата Миссисипи (США), где ежегодные убытки отрасли составляют 30-60 млн долларов. Живая ослабленная иммерсионная вакцина AquaVac FNM (MSD Animal Health) одобрена для применения в американском сомоводстве [5, 7].

Таблица 1. Основные бактериальные патогены рыб: зафиксированный ущерб и средства иммунопрофилактики.

Патоген	Нозология	Хозяева	Тип вакцины	Зафиксированный ущерб и результат вакцинации
<i>A. salmonicida</i>	Фурункулез	Лосось, форель	Убитая, инъекция	Норвегия, 1980-е: массовая эпизоотия на тысячах ферм; вакцинация снизила расход антибиотиков на 99% [10]

Патоген	Нозология	Хозяева	Тип вакцины	Зафиксированный ущерб и результат вакцинации
<i>A. hydrophila</i>	Аэромоноз	Карп, тиляпия, сом	Убитая, пероральная	Россия: прудовые хозяйства Брянской, Смоленской обл.; гибель до 70-100% молоди; разработана вакцина ВЮС-2 ВНИИПРХ [8]
<i>V. anguillarum</i>	Вибриоз	Лосось, форель, треска	Убитая, инъекция + иммерсия	Карелия: СПК "Гридино" - вакцинированы 50 тыс. форелей (220 г) иммерсией 30 мин; иммунитет подтвержден [2]; 1-я коммерческая вакцина для рыб (США, 1976) [7]
<i>Y. ruckeri</i>	Болезнь красного рта (ERM)	Форель, лосось	Погружная, пероральная	Европа, Сев. Америка: AquaVac ERM (MSD); без вакцинации гибель 30-40%; обработка до 100 тыс. мальков/ч [5]
<i>P. salmonis</i>	Писцирикеттсиоз (SRS)	Атлантический, тихоокеанский лосось	Убитая + адъювант	Чили: 300-700 млн \$ ущерба ежегодно; 50-80% антибиотиков страны на SRS; RPS вакцин 40-60% [5, 10]

Патоген	Нозология	Хозяева	Тип вакцины	Зафиксированный ущерб и результат вакцинации
<i>S. iniae</i>	Стрептококкоз	Тиляпия, морской окунь	Убитая, инъекция	ЮВА, Ближний Восток: летальность 50-75%; зоонозный потенциал; вакцины применяются в Израиле, Малайзии [1, 5]
<i>F. columnare</i>	Столбчатка (<i>columnaris</i>)	Сом, форель, карп	Живая ослабленная, погружная	США (Миссисипи): ущерб сомоводства 30-60 млн \$/год; препарат AquaVac FNM (MSD) [5, 7]

Примечание. Инакт. – инактивированная; ослабл. – живая аттенуированная; RPS – относительный процент выживаемости.

3. ТИПЫ ВАКЦИН И ОПЫТ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В АКВАКУЛЬТУРЕ

3.1. Инактивированные цельноклеточные вакцины

Цельноклеточные убитые препараты составляют исторически первый и наиболее массово применяемый класс вакцин для рыб. Патоген инактивируется формальдегидом или бета-пропиолактоном с сохранением иммуногенной структуры; для депо-эффекта и усиления иммунного ответа в состав вводят масляный адъювант [1]. Коммерческий портфель включает: шестикомпонентный ALPHA JECT 6-1 (Pharmaq/Zoetis), обеспечивающий защиту атлантического лосося от трех вирусов (IHNV, VHS, IPNV) и трех бактериальных патогенов одновременно; AquaVac Vibrio (MSD Animal Health) – погружной препарат против вибриоза; Norvax Minova 6 (Zoetis) – поливалентная инъекционная вакцина для атлантического лосося [5, 7].

3.2. ДНК-вакцины

Первый в мире лицензированный ветеринарный биопрепарат на основе плазмидной ДНК создан именно для рыб: Arex-IHNV (Elanco, Канада, 2005) нацелен на вирус инфекционного гематопозитического некроза тихоокеанского лосося. В 2017 году Европейское агентство по лекарственным средствам одобрило Cluнав (Elanco) против альфавируса SAV. Механизм действия принципиально отличается от убитых препаратов: введенная плазида побуждает клетки хозяина самостоятельно синтезировать целевой белок, запуская как гуморальный, так и клеточный иммунный ответ; RPS при однократной инъекции достигает 80-95% [4, 5]. В Российской Федерации в 2025 году сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» (лаборатория природных полимеров, ПИЯФ-ИВС) провели первый пилотный эксперимент с прототипом отечественной ДНК-вакцины на судаке в условиях промышленной аквакультуры Ленинградской области, сравнив эффективность инъекционного, перорального и иммерсионного путей введения [3].

3.3. Первая отечественная шестикомпонентная вакцина для лососевых

В 2024 году в ФГБУ «ВНИИЗЖ» (г. Владимир) совместно с ФГБУ «ВГНКИ» завершена разработка инаktivированной эмульсионной вакцины для радужной форели и атлантического лосося, обеспечивающей защиту от шести вирусных патогенов (IPN, IHN, VHS и др.). Рабочий объем разовой дозы составляет 0,1 мл; к вакцинации допускается рыба массой от 40 г; длительность иммунной защиты превышает 12 месяцев. Для апробации был специально оборудован аквариальный комплекс, а клинические испытания охватили 5 млн особей [5]. По данным заведующего референтной лабораторией болезней аквакультуры ВНИИЗЖ В.А. Мельникова, препарат ожидает государственной регистрации [5].

3.4. Дефицит зарегистрированных вакцин на внутреннем рынке

Несмотря на успехи ВНИИЗЖ, на российском рынке по-прежнему отсутствуют легализованные коммерческие вакцины для рыб. Отечественные аквахозяйства вынуждены опираться на антибиотики и препараты неспецифической стимуляции резистентности, что противоречит тенденциям регуляторного ограничения применения антимикробных средств. Рыбоводные предприятия нередко уклоняются от официального подтверждения вспышек заболеваний из-за опасений надзорных санкций, что создает дефицит биологического материала для исследований [5]. Для сбора изолятов возбудителей и разработки новых биопрепаратов АО «Рыбные Корма» совместно с научным сообществом инициировало формирование отраслевой рабочей группы [5]. Отдельные участники рынка выступают за принятие государственной «дорожной карты» по развитию вакцин для аквакультуры – по аналогии с уже действующей программой поддержки производства рыбных кормов [5].

4. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ ВВЕДЕНИЯ ВАКЦИН

В практике рыбоводства сложились три принципиальных пути доставки антигена. Парентеральный (инъекционный) метод – внутрибрюшинное введение – генерирует наиболее выраженный и продолжительный специфический ответ (RPS 70-95%) и составляет основу норвежской программы массовой иммунизации лосося [10]. Мукозальный (погружной) метод – кратковременная или длительная экспозиция рыбы в растворе антигена – стимулирует систему лимфоидных тканей, ассоциированных со слизистыми оболочками (MALT: SALT, GALT, GALT), что особенно значимо при кожных и жаберных инфекциях; RPS составляет 50-80% [4]. Пероральный метод (антиген в корме) обеспечивает минимальную стрессовую нагрузку и неограниченный масштаб применения при самом низком среди трех путей показателе RPS (30-70%) вследствие деградации белковых антигенов в кислой и ферментативной среде желудочно-кишечного тракта; перспективным техническим решением служит заключение антигена в микро- или наночастицы из биосовместимых полимеров [4, 5].

Таблица 2. Сопоставление методов введения вакцин рыбам.

Критерий	Инъекционный	Иммерсионный	Пероральный
Путь введения	Внутрибрюшинная инъекция	Погружение в раствор вакцины	Добавление в корм или воду
RPS	70-95%	50-80%	30-70%
Минимальная масса рыбы	5-10 г и выше	0,5-5 г (ранняя молодь)	Без ограничений
Стрессовая нагрузка	Значительная (наркоз)	Умеренная	Минимальная
Пропускная способность	1-10 тыс. особей/ч	Свыше 100 тыс. особей/ч	Без ограничений
Потребность в адъюванте	Обязателен (масляный)	Как правило, не нужен	Капсулирование антигена
Нежелательные явления	Перитонеальные спайки, гранулемы	Редкие, невыраженные	Деградация антигена в ЖКТ

Критерий	Инъекционный	Иммерсионный	Пероральный
Себестоимость на особь	Высокая	Умеренная	Низкая
Типичное применение	Лососевые фермы Норвегии, Чили, России	Форелевые и карповые питомники Европы, Азии	Тиляпия, карп (Азия, Африка)

$RPS \text{ (Relative Percent Survival)} = [1 - (\text{доля гибели вакцинированных} / \text{доля гибели контрольных})] \times 100.$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бактериальные инфекции остаются ведущим лимитирующим фактором устойчивого наращивания объемов промышленной аквакультуры. Норвежский прецедент убедительно подтверждает, что целенаправленная иммунизация способна вытеснить антибиотики из производственного цикла: при многократном росте выпуска лосося расход антибактериальных средств упал более чем на 99% [10]. В России завершена разработка первого шестикомпонентного инактивированного биопрепарата для лососевых (ВНИИЗЖ/ВГНКИ, 2024), тем не менее ни одна коммерческая вакцина для рыб не прошла государственную регистрацию [5]. Перспективным направлением выступают ДНК-вакцины, испытания прототипов которых начаты в условиях отечественной индустриальной аквакультуры [3]. Для реализации стратегической цели – утроения объемов аквакультурного производства к 2030 году – необходимо ускорить регистрацию вакцин, наладить системный эпизоотический мониторинг и сформировать институциональную основу для разработки новых иммунобиологических препаратов под актуальные штаммы патогенов, циркулирующих в российских рыбоводных хозяйствах.

Литература

1. Нечипуренко М.А., Тихомиров Д.Д. Вакцинация водных организмов [Электронный ресурс]. // Актуальные исследования. – URL: <https://apni.ru/article/12254-vakcinaciya-vodnyh-organizmov>.
2. Дрошнев А.Е., Завьялова Е.А., Гулюкин М.И., Хлунов О.В. Современная вакцинопрофилактика радужной форели против вибриоза [Электронный ресурс]. // КиберЛенинка. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-vaktsinoprofilaktika-raduzhnoy-foreli-protiv-vibrioza/viewer>.
3. Зубарева А.С. Первые в РФ ДНК-вакцины рекордно увеличат выживаемость рыбы в хозяйствах [Электронный ресурс]. // Известия МИЦ / НИЦ «Курчатовский институт». – URL: <https://nrcki.ru/product/mic-izvestiya/-52052.shtml>.
4. Xu Z. Immunoglobulins, Mucosal Immunity and Vaccination in Teleost Fish [Электронный ресурс]. // Frontiers in Immunology. – URL: <https://www.frontiersin.org/journals/immunology/articles/10.3389/fimmu.2020.567941/full>.
5. Зубарева А. Безмолвный пациент: история и перспективы вакцинации в аквакультуре [Электронный ресурс]. // Биомолекула. – URL: <https://biomolecula.ru/articles/bezmolvnyi-patsient-istoriia-i-perspektivy-vaktsinatsii-v-akvakulture>.
6. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Rome: FAO, 2024. 270 p [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-world-fisheries-and-aquaculture/en>.
7. Adams A. Progress, challenges and opportunities in fish vaccine development [Электронный ресурс]. // Fish & Shellfish Immunology. – URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31039441/>.
8. Приказ Минсельхоза России от 14.04.2020 N 196 «Об утверждении Ветеринарных правил. аэромонозов лососевых и карповых рыб»

[Электронный ресурс]. – URL:
https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_352792/.

9. Итоги деятельности Федерального агентства по рыболовству в 2021 году.
М.: Росрыболовство, 2022 [Электронный ресурс]. – URL:
https://fish.gov.ru/wp-content/uploads/2022/05/itogi_raboty_rosrybolovstvo_za_2021_god.pdf.
10. Всемирная организация здравоохранения. Вакцинация лосося: как Норвегия избегает использования антибиотиков при разведении рыбы.
Женева: ВОЗ, 2015 [Электронный ресурс]. – URL:
<https://www.who.int/ru/news/item/07-11-2017-stop-using-antibiotics-in-healthy-animals-to-prevent-the-spread-of-antibiotic-resistance>.