

УДК: 659.3.043.13

DOI: 10.52419/issn2072-2419.2026.1.138

## ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОРМЛЕНИЯ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭПИЗООТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ В РЫБОВОДСТВЕ

**Карпенко Л.Ю.**<sup>1</sup> – д-р биол. наук, проф., зав. каф. биохимии и физиологии (ORCID 0000-0002-2781-5993); **Полистовская П.А.**<sup>1\*</sup> – канд. биол. наук, доц. каф. биохимии и физиологии (ORCID 0000-0003-1977-0913); **Сидорова Н.А.**<sup>2</sup> – канд. биол. наук, доц., доц. каф. зоологии и экологии (ORCID 0000-0002-9659-9235); **Савушкин А.И.**<sup>2</sup> – науч. сотр. (ORCID 0009-0003-5202).

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

\*p.polistovskaya@mail.ru

**Ключевые слова:** аквакультура, биогены, гематологические параметры, функциональное кормление, мониторинг, эпизоотии, экологические риски, *Chlorella sorokiniana* AGT.

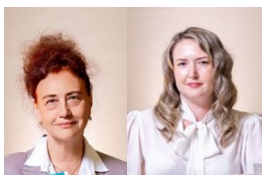
**Keywords:** aquaculture, biogens, hematological parameters, functional feeding, monitoring, epizootics, ecological risks, *Chlorella sorokiniana* AGT.

**Финансирование:** исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 322-23 (Соглашение № 23-16-20026), проводимого совместно с Республикой Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия (ФВИ РК).

Поступила: 23.12.2025

Принята к публикации: 05.03.2026

Опубликована онлайн: 01.04.2026



### РЕФЕРАТ

В статье приводятся результаты оценки эффективности интегрированной системы функционального кормления и мониторинга водной среды с целью контроля над эпизоотическими и экологическими рисками в рыбководстве. На примере функциональной кормовой добавки, содержащей штамм *Chlorella vulgaris* штамм ГКО ВКПМ А1-24, рассматривается возможность применения функционального кормления для улучшения физиологического состояния рыб, усвояемости питательных веществ и снижения экологических рисков. Особое внимание уделено ихтиогематологическим параметрам и содержанию биогенных элементов (азота и фосфора) для оперативного контроля над условиями содержания объектов аквакультуры. Показано, что синергетический эффект от сочетания функционального кормления и мониторинга способствует уменьшению негативного воздействия на водные экосистемы, повышению продуктивности и экономической эффективности рыбководства. Предложенная стратегия представляет практический интерес для внедрения в условиях интенсивного выращивания высокопродуктивных пород рыб с целью обеспечения устойчивого развития аквакультуры.

## ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

С ростом объемов аквакультуры и усилением антропогенного давления на водные экосистемы возрастает потребность в устойчивых и экологически безопасных методах управления рыбоводными объектами. Одной из таких стратегий является функциональное кормление, применение кормов и кормовых добавок, необходимых для здоровья, иммунитета и продуктивности рыб [4,9]. К функциональным добавкам относят про- и пребиотики, фитогены, иммуномодуляторы, микро- и макроэлементы, ряд других биологически активных соединений. Исследованиями подтверждено их положительное влияние на рост, выживаемость и резистентность объектов аквакультуры к патогенам [6]. Однако, масштабное применение функциональных кормовых добавок в практике индустриального рыбоводства все еще остаётся ограниченным. Во многом, это связано с несовершенством системы кормления в современном рыбоводстве, которая должна складываться не только из процессов использования специализированных комбикормов для обеспечения рыбы необходимым рационом, но и из оптимизации кормления с целью снижения потерь корма в процессе выращивания рыбы и увеличения его усвояемости. Избыток корма может поступать в окружающую среду, что приводит к экологическим рискам для водных экосистем из-за накопления питательных веществ, органики, тенденции к эвтрофикации [5]. Обнаружено, что только 20-30% фосфора и 25-40% азота в составе корма усваиваются рыбой, остальное количество биогенных элементов поступает в окружающую среду [2]. Избыток корма, метаболиты рыб также могут оседать на дно водоемов, что часто провоцирует полную смену состава бентических сообществ, исчезновение чувствительных видов и массовое развитие гидробионтов полисапробной группы [7,11]. Ряд авторов отмечает серьезную опасность для водных экосистем лечебных и профилактических добавок к кормам, содержащих антибиотики, фунгициды и тяжелые

металлы (цинк, медь, кадмий), которые часто обнаруживаются в составе рыбной муки [3,15].

Эпизоотические и экологические риски возможно сократить за счет использования интегрированной системы функционального кормления (ИСФК) рыбы, под которой понимается комплексный технологический подход в аквакультуре, объединяющий в единую управляемую систему применение функциональных кормовых добавок, мониторинг состояния организма рыбы и водной среды и алгоритм обратной связи для управления процессом кормления в реальном времени. Цель ИСФК заключается в рациональной и безопасной для окружающей среды технологии кормления в сочетании с возможностью управления физиологическим состоянием объектов аквакультуры и качеством среды обитания рыбы. Интеграция функционального кормления с системой наблюдения за динамикой ихтиогематологических, гидрохимических и гидробиологических параметров позволяет создать адаптивную систему управления, минимизирующую эпизоотические и экологические риски и одновременно повысить устойчивость объектов аквакультуры к неблагоприятным средовым факторам.

Мы предполагаем, что использование функциональной кормовой добавки на основе *Chlorella vulgaris* позволяет одновременно решить две основные задачи: повысить неспецифическую резистентность организма рыб (снижение эпизоотического риска) за счет оптимизации белкового обмена и стимуляции клеточных факторов защиты; снизить нагрузку на водную экосистему (снижение экологического риска) за счет повышения усвояемости корма и, как следствие, уменьшения выделения азота и фосфора в воду.

Основная цель представленного исследования заключалась в комплексной оценке эффективности интегрированной системы функционального кормления и мониторинга водной среды для контроля над возможными рисками в условиях аквариального эксперимента.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ /  
MATERIALS AND METHODS**

Для реализации цели исследования проведен кормленческий опыт, в рамках которого выполнена апробация введения в рацион молоди радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) функциональной кормовой добавки, содержащей *Chlorella vulgaris* штамм GKO ВКПМ А1-24 в количестве 500 млн. клеток в 1 мл концентрата. Как функциональная добавка к корму, хлорелла является полноценным источником белков (до 61.6 %), жиров (12.5 %), углеводов (13.7 %), ряда микроэлементов, витаминов группы В, С, Е, D, К, пигментов [1]. Объектом исследования служила молодь радужной форели в возрасте 4 месяцев, средней массой 5,5–5,9 г (табл. 2). Рыбу содержали в аквариальной установке замкнутого водоснабжения (УЗВ) объемом 100 л, с постоянной аэрацией и биофильтрацией. Температура воды под-

держивалась на уровне 14,7±0,3°C, pH 6,64±0,3, содержание кислорода – не менее 8 мг/л. Световой режим: 12 ч свет / 12 ч темнота.

Оценку эффективности функционального кормления с использованием хлореллы и мониторинг водной среды проводили на базе Научно-исследовательского центра по аквакультуре Института биологии, экологии и агротехнологий Петрозаводского государственного университета с привлечением ресурсов ООО «Микробиом» инновационного сектора Петрозаводского государственного университета. Для опыта рыбу отбирали случайно и распределяли по 3 группам (2 контрольные группы и 1 опытная) по 20 особей в каждой. В качестве отрицательного контроля (контроль 1) использовали стартовый корм для молоди форели «Аква Фид» размер гранул 2 мм. Состав используемого корма отображен в таблице 1.

**Таблица 1 – Состав стартового корма для молоди форели производства «Аква Фид»**

Состав корма	Размер гранул, мм		
	0.1	0.2	0.4
Протейн (%)	64	64	64
Жир (%)	8	8	8
Углеводы (%)	8,9	8,9	8,9
Зола (%)	12,1	12,1	12,1
Волокно (%)	1,0	1,0	1,0
Фосфор (%)	1,4	1,4	1,4
Энергетическая ценность (МДж)	19,4	19,4	19,4
Усваиваемая энергия (МДж)	18,0	18,0	18,0

В качестве положительного контроля (контроль 2) – тот же корм с добавлением пробиотика «Ветом 1.1» производства ООО НПФ «Исследовательский центр», содержащий штамм *Bacillus subtilis* ВКПМ В-10641 (DSM 24613) в количестве 1·10<sup>6</sup> КОЕ (колониеобразующих единиц) в 1 г препарата. Пробиотик вносили в корм в виде водной суспензии из расчёта 10 мл рабочего раствора на 1 кг корма (предварительно 1 г порошка растворяли

в 10 мл воды). В опытной группе к корму добавляли концентрат хлореллы «АльгоБустер» из расчёта 10 мл на 1 кг корма. Общая продолжительность кормленческого опыта составила 40 суток. Кормовые добавки вносили в рацион рыбы при каждом кормлении из расчета 10 мл на 1 кг корма. Кормление осуществляли ежедневно, 2 раза в сутки. Суточный рацион для рыбы, с учетом мощности биофильтра, составлял 1,0 % от общей

биомассы. Пересчет нормы кормления по мере роста мальков выполняли 1 раз за 14 суток, на основании результатов контрольных взвешиваний. Перед проведением опыта рыбу предварительно акклиматизировали в течение 14 суток. Во время опыта оценивали ихтиогематологические параметры, ключевые показатели среды выращивания рыбы, рыбоводно-биологические показатели (выживаемость, рост, продуктивность) и экологическую нагрузку. Отбор проб крови у рыб осуществлялся согласно установленной методике [14]. Биохимические показатели крови определяли на автоматическом биохимическом анализаторе Chem Well (Awareness Technology, США): аланинтрансфераза (АЛТ) – УФ-кинетическим методом, аспартатамино-трансфераза (АСТ) – УФ-кинетическим методом, щелочная фосфатаза – кинетическим методом, общий белок – биуретовым методом, альбумины - колориметрическим методом, креатинин – кинетическим методом Яффе, мочевины – ферментативным колориметрическим методом по Бертелоту, глюкоза – ферментативным глюкозооксидазным методом, общий билирубин – количественным определением методом Walters и Gerarde, общий холестерин – ферментативно-колориметрическим методом.

Для оценки физиологического состояния рыб определяли следующие гематологические показатели: количество эритроцитов и лейкоцитов, концентрацию гемоглобина, гематокрит, лейкоцитарную формулу [14]. Подсчёт количества эритроцитов проводили в камере Горяева, лейкоцитов – по соотношению к эритроцитам в мазках крови [15], гематокрит определяли микроцентрифугированием с помощью микроцентрифуги Hettich Haematokrit 200, гемоглобин – гемихромным методом на фотометре ФБС-01-2 ("Микролаб 540").

К ключевым параметрам водной среды относили температуру, рН, содержание аммиака, нитритов, фосфатов, к рыбоводно-биологическим - выживаемость, рост, продуктивность. Экологический

след рассчитывали по биогенным элементам – азоту (N) и фосфору (P). Для расчетов использовали данные за период исследования: общую массу внесенного корма (M корма, г), содержание азота в корме (мг/г), содержание фосфора в корме (мг/г), массу выращенной рыбы (M рыба, г), начальную массу рыбы (M начальная, г), содержание азота в рыбе (N в рыбе 2.5-3.2% от сырой массы), содержание фосфора в рыбе (P в рыбе 0.4-0.7% от сырой массы) [8]. Для оценки различий между тремя группами по рыбоводно-биологическим показателям (табл.2) применяли однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с последующим *post-hoc* тестом Тьюки. Для сравнения двух групп (контроль 1 и опыт) по гематологическим и биохимическим показателям (табл. 3, 4) использовали *t*-критерий Стьюдента для независимых выборок после проверки нормальности распределения (критерий Шапиро–Уилка). Различия считали статистически значимыми при  $p \leq 0,05$ . В таблицах данные представлены как  $M \pm m$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

За период исследования выживаемость во всех группах составила 90%, молодь форели активно питалась. Результаты однофакторного дисперсионного анализа показали наличие статистически значимых различий между группами по конечной массе, абсолютному и относительному приросту, кормовому коэффициенту ( $p < 0,001$ ). *Post-hoc* тест Тьюки выявил, что опытная группа достоверно превосходила обе контрольные группы по всем ростовым показателям ( $p < 0,05$ ), тогда как различия между контрольными группами 1 и 2 не были статистически значимыми ( $p > 0,05$ ). Максимальные рыбоводно-биологические показатели установлены для опытной группы молоди радужной форели, получавшей с кормом концентрат хлореллы ( $p < 0,05$ ) (табл. 2).

Гематологический анализ был выполнен для контрольной группы 1 (стандартный корм) и опытной группы, так как предварительный анализ показал отсутствие достоверных различий между

контролем 1 и контролем 2 по изучаемым параметрам, что согласуется с данными рыбоводно-биологических показателей.

Результаты исследования гематологического статуса радужной форели представлены в таблице 3.

**Таблица 2 – Рыбоводно-биологические показатели исследуемых групп молоди радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*)**

Показатель	Группа		
	1 группа контроль	2 группа контроль	опытная группа
М начальная, г	5,8±0,3	5,5±0,5	5,9±0,3
М конечная, г	12,5±0,4	13,1±0,2	15,3±0,4 <sup>#</sup>
Начальная биомасса, г	117,4±1,7	112,7±2,3	119,3±1,9
Конечная биомасса, г	224,1±2,6	235,3±2,1	273,3±2,7 <sup>#</sup>
Абсолютный прирост, г	6,6±0,2	7,6±0,4	9,2±0,3 <sup>#</sup>
Относительный прирост, %	113,7±1,9	138,2±2,9	154,2±2,4 <sup>#</sup>
Норма кормления, %	1,0	1,0	1,0
Кормовой коэффициент	0,65±0,02	0,75±0,01	0,79±0,01 <sup>#</sup>
Съедено корма за 40 суток, г	34,8	35,8	35,8

Примечание: \* – различия достоверны по сравнению с контролем 1 ( $p < 0,05$ ); # – различия достоверны по сравнению с контролем 2 ( $p < 0,05$ ).

**Таблица 3 – Гематологические показатели контрольной и опытной групп радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), (M±m)**

Показатель, ед.изм.	Референтные значения <sup>1</sup>	Подопытные группы	
		Контрольная группа	Опытная группа
Гемоглобин, г/л	75-100	71,70±1,87	76,20±2,09*
Эритроциты, млн/мкл	1,2-1,92	1,108±0,060	1,219±0,070*
Лейкоциты, млн/мкл	20-26	21,40±0,65	23,20±0,66
Гематокрит, л/л <sup>10<sup>2</sup></sup>	28-35	23,5±1,0	28,10±0,64*
МСV, фл	145,8–291,7	212,1±5,5	230,5±12,4
МСН, пг	39,1–83,3	64,7±2,3	62,5±2,7
Цветовой показатель	1,17–2,50	1,94±0,07	1,88±0,08

Примечание: <sup>1</sup>Референтные значения приведены по [15, 16].

\* –  $p \leq 0,05$  по *t*-критерию Стьюдента относительно группы контроля 1.

В опытной группе зафиксировано достоверное увеличение уровня Hb на 6,3% (76,2 г/л против 71,7 г/л в контроле). При этом в контрольной группе среднее значение находилось ниже физиологической нормы, тогда как в опытной группе показатель достиг нижней границы нормы, что свидетельствует об улучшении синтеза гемоглобина и усилении кислородтранспортного потенциала крови [13, 14].

Аналогичная динамика наблюдалась

и по количеству эритроцитов: в опытной группе зарегистрировано увеличение на 10% (1,219 млн/мкл против 1,108 млн/мкл), что позволило вывести этот показатель в зону физиологической нормы. Это указывает на стимуляцию эритропоэза под влиянием добавки [14]. Наиболее выраженные изменения отмечены по величине гематокрита: в опытной группе показатель Ht увеличился на 19,6% (28,1% против 23,5%) и достиг нижней границы нормы, что свидетельствует об

увеличении количества эритроцитов и улучшении их морфофункциональных характеристик. В опытной группе отмечалась тенденция к увеличению MCV, что может указывать на активацию эритропоэза с выходом в кровоток более молодых форм эритроцитов [13]. Среднее содержание гемоглобина в эритроците (МСН) оставалось стабильным, что свидетельствует о нормальном насыщении эритроцитов гемоглобином. Цветовой показатель оставался в пределах нормы во всех группах, указывая на нормохромный характер эритропоэза.

Таким образом, комплексное улучшение эритроцитарных показателей в опытной группе свидетельствует о значительном усилении кислородтранспортной функции крови, что создаёт благоприятные условия для интенсификации метаболизма и роста рыб.

В опытной группе отмечено достоверное увеличение общего количества

лейкоцитов на 8.4% (23,2 млн/мкл против 21,4 млн/мкл в контроле). Увеличение общего количества лейкоцитов, хотя и не достигло статистической значимости, может рассматриваться как тенденция к активации неспецифического клеточного иммунитета, что в условиях реального производства (при неизбежном контакте с условно-патогенной микрофлорой) способно повысить резистентность организма к инфекционным агентам и снизить риск вспышек бактериальных заболеваний [10].

Биохимический анализ сыворотки крови является высокоинформативным методом, позволяющим оценить функциональное состояние внутренних органов и интенсивность метаболических процессов в организме рыб. Биохимический анализ сыворотки крови выполнен для тех же групп (контроль 1 и опыт), результаты представлены в таблице 4.

**Таблица 4 – Биохимические показатели сыворотки крови контрольной и опытной групп радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), (M±m)**

Показатель, ед.измерения	Контрольная группа	Опытная группа
АЛАТ, МЕ\л	8,26±0,14	8,38±0,16
АсАТ, МЕ\л	12,92±0,14	12,97±0,24
ЩФ, МЕ\л	34,54±0,70	34,41±0,59
Общий белок, г/л	31,94 ±0,53	33,56 ±0,87
Альбумины, г/л	11,91±0,17	12,16±0,3
Креатинин, мкмоль/л	60,50±0,48	59,52±0,79
Мочевина, ммоль/л	1,31±0,06	1,30±0,04
Глюкоза, ммоль/л	4,47±0,12	4,11±0,12*
Билирубин, мкмоль/л	1,371 ± 0,001	1,200 ± 0,001*
Холестерин, ммоль/л	0,065 ± 0,003	0,067 ± 0,002

Примечание: \* –  $p \leq 0,05$  по *t*-критерию Стьюдента относительно группы контроля.

Показатели цитолиза и функции печени (АЛАТ, АсАТ, ЩФ) находились в пределах физиологической нормы и не имели достоверных различий между группами. Активность внутриклеточных ферментов была стабильной и низкой. Отсутствие повышения активности АсАТ, которая может указывать на стресс или повреждение мышечной ткани [4], является благоприятным признаком. Уровень щелочной

фосфатазы, фермента, связанного с процессами роста костной ткани и мембранами желчных протоков, также оставался стабильным, что свидетельствует об отсутствии холестатических явлений и нормальном фосфорно-кальциевом обмене [4]. Концентрация общего билирубина была минимальной; достоверное снижение в опытной группе (1,200 против 1,371 мкмоль/л) не выходит за пределы рефе-

рентных значений и, вероятно, связано с индивидуальной вариабельностью.

В опытной группе зафиксирована тенденция к увеличению концентрации общего белка (с 31,94 до 33,56 г/л, +5,1%) и альбуминов (с 11,91 до 12,16 г/л, +2,1%), однако различия статистически не значимы ( $p > 0,05$ ). Повышение уровня альбуминов косвенно может указывать на интенсификацию белкового синтеза в печени, что согласуется с более высокими темпами роста в этой группе [1, 4]. Повышение уровня общего белка и альбуминов создаст благоприятный белковый фон для синтеза защитных белков (иммуноглобулинов, лизоцима, факторов комплемента) гепатоцитами, что является важным звеном в системе гуморального иммунитета [12].

Уровень мочевины и креатинина оставался стабильным и не имел достоверных различий между группами. Стабильность этих показателей свидетельствует о сохранении выделительной функции почек и отсутствии нарушений азотистого обмена [4]. Отсутствие увеличения мочевины на фоне тенденции к повышению общего белка позволяет предположить, что дополнительный азот используется преимущественно на пластические нужды, а не катаболизируется.

Уровень глюкозы в крови опытной группы был достоверно ниже (4,11 против 4,47 ммоль/л,  $p < 0,05$ ), оставаясь в пределах физиологической нормы. Это может объясняться более активным использованием глюкозы в качестве энергетического субстрата в условиях интенсификации метаболизма [4]. Концентрация холестерина была сопоставима в обеих группах.

Таким образом, улучшение ключевых гематологических и биохимических параметров (эритропоз, лейкоцитарный профиль, белковый обмен) под действием функциональной кормовой добавки свидетельствует о повышении неспецифической резистентности организма форели. Это является фундаментальной основой для снижения эпизоотического риска, так как здоровый организм с высоким иммунным статусом менее восприимчив к патогенам.

В течение кормленческого опыта средняя температура воды во всех рыбководных ёмкостях находилась в диапазоне  $14,7 \pm 0,3^\circ\text{C}$ , pH –  $6,64 \pm 0,3$ , содержание  $\text{NH}_4^+$  изменялось от 0 до 0,003 мг/л,  $\text{NO}_2^-$  находилось в пределах нулевых значений, содержание  $\text{NO}_3^-$  изменялось от 0 до 5 мг/л, содержание  $\text{PO}_4^{+}$  – от 1,5 до 5,0 мг/л.

**Таблица 5 – Показатели биогенной нагрузки на окружающую среду по результатам кормленческого опыта**

Показатели	Подопытные группы		
	1 группа контроль	2 группа контроль	Опытная группа
Поступление N и P с кормом			
М N, мг/г	3,2±0,1	3,3±0,1	3,3±0,1
М P, мг/г	0,90±0,02	0,90±0,02	0,90±0,02
Аккумуляция N и P в рыбе			
М N, мг/г	2,9±0,3	3,4±0,2	4,3±0,2
М P, мг/г	0,50±0,03	0,60±0,01	0,80±0,02
Поступление избытка N и P в окружающую среду			
М N, мг/л	0,30±0,01	-0,10±0,01	-1,00±0,01
М P, мг/л	0,40±0,02	0,30±0,01	0,10±0,01

Результаты расчета экологического следа по биогенным элементам представлены в таблице 5. Для каждого варианта кормленческого опыта рассчитан массовый баланс с учетом количества азота (N) и фосфора (P), которые поступили в систему с кормом и количеством, которое было усвоено рыбой. В контроле 1 избыток азота, в среднем, составил 0,3 мг/л, а P – 0,4 мг/л. В контроле 2 и в опыте весь азот аккумулировался в организме рыбы. Избыток P в контроле 2 составил 0,3 мг/л, а в опыте – 0,1 мг/л.

#### **ВЫВОДЫ / CONCLUSION**

В результате проведенного исследования установлено, что включение в рацион молоди радужной форели функциональной кормовой добавки на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* (препарат «АльгоБустер») в дозе 10 мл/кг корма способствует:

1. Достоверному повышению рыбо-водно-биологических показателей: конечной массы, абсолютного и относительного прироста, кормового коэффициента по сравнению с контролем (стандартный корм) и группой, получавшей пробиотик «Ветом 1.1».

2. Улучшению гематологических параметров: увеличению уровня гемоглобина, количества эритроцитов и гематокрита до нижней границы физиологической нормы, что свидетельствует об активации эритропоэза и усилении кислородтранспортной функции крови.

3. Отсутствию негативного влияния на функциональное состояние печени и почек, подтвержденному стабильностью ферментов (АлАТ, АсАТ, ЩФ), креатинина и мочевины в сыворотке крови. Достоверное снижение глюкозы в опытной группе может указывать на более активное использование энергетических ресурсов в условиях ускоренного роста.

4. Снижению экологической нагрузки за счёт более полной ассимиляции азота и фосфора: в опытной группе отмечена максимальная аккумуляция биогенов в теле рыбы и минимальный их выброс в воду (избыток фосфора 0,1 мг/л, отрицательный баланс азота). Это подтверждает,

что функциональное кормление с использованием хлореллы способствует повышению усвояемости корма и снижению риска эвтрофикации среды выращивания рыбы.

5. Способствует снижению эпизоотических рисков, что подтверждается активацией эритро- и лейкопоэза, а также оптимизацией белкового обмена у радужной форели. Данные изменения лежат в основе повышения общей резистентности организма к воздействию неблагоприятных факторов и потенциальных патогенов.

Таким образом, предложенная стратегия интеграции функционального кормления с постоянным мониторингом ихтиогематологических и гидрохимических параметров представляет собой научно обоснованный, экологически устойчивый и экономически целесообразный подход к управлению современными аквакультурными системами. Результаты исследования открывают перспективы для широкого внедрения подобных решений в практику интенсивного рыбоводства, особенно при выращивании ценных пород, таких как радужная форель, в условиях обеспечения устойчивого развития аквакультуры. Полученные первичные данные по применению функциональных кормовых добавок и результатам расчета экологического следа по биогенным элементам могут служить основой для разработки методических рекомендации для рыбоводных хозяйств с целью повышения экологической безопасности и устойчивости технологического процесса выращивания высокопродуктивных объектов аквакультуры. Результаты исследования подтверждают возможность использования функционального кормления для уменьшения антропогенной нагрузки на водоемы за счёт оптимизации кормления и снижения экскреции питательных веществ. Возможность масштабирования интегрированной системы функционального кормления на прудовые, садковые и замкнутые системы водоснабжения может стать основой для перехода к «зелёному» рыбоводству в рамках нацио-

нальных и международных экологических стандартов.

**THE SIGNIFICANCE OF FUNCTIONAL FEEDING FOR REDUCING EPIZOOTIC AND ENVIRONMENTAL RISKS IN AQUACULTURE**

**Karpenko L.Yu.**<sup>1</sup> - Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Biochemistry and Physiology, (ORCID 0000-0002-2781-5993); **Polistovskaya P.A.**<sup>1\*</sup> – Ph.D. in Biology, Assoc. Prof. of the Department of Biochemistry and Physiology, (ORCID 0000-0003-1977-0913); **Sidorova N.A.**<sup>2</sup> – Candidate of Sciences. Biol. sciences, assoc., assoc. Department of Zoology and Ecology (ORCID 0000-0002-9659-9235); **Savushkin A.I.**<sup>2</sup> – scientific. comp. (ORCID 0009-0003 -5202)

<sup>1</sup> -St. Petersburg State University of Veterinary Medicine

<sup>2</sup> -Petrozavodsk State University

\*p.polistovskaya@mail.ru

**Financing:** *The study was supported by grant No. 322-23 of the Russian Science Foundation (Agreement No. 23-16-20026), conducted jointly with the Republic of Karelia with funding from the Venture Investment Fund of the Republic of Karelia (VIF RK).*

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1.Ahmad, M.T. Applications of microalga *Chlorella vulgaris* in aquaculture / M.T. Ahmad, M. Shariff, F.M. Yusoff et al. // *Reviews in Aquaculture*. - 2020. - 12. - P. 328-346.  
2.Bureau, D.P. Towards effective nutritional management of waste outputs in aquaculture, with particular reference to salmonid aquaculture operations / D.P. Bureau, K. Hua // *Aquaculture Research*. - 2010. - 41(5). - P. 777-792.  
3.Cabello, F. C. Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture / F. C. Cabello // *Environ Microbiol*. - 2006. - 8(7). - P. 1137-1144.  
4.Dawood, M.A.O. The potential role of nano-selenium and vitamin C on the performances of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) / M.A.O. Dawood, M.Zommara, N.M.

Eweedah, A.I. Helal, M.A. Aboel-Darag // *Environ. Sci. Pollution Res.* - 2020. DOI:org/10.1007/s11356-020-07651-5.

5.Diana, J.S. Aquaculture Production and Biodiversity Conservation Get access Arrow / J.S. Diana // *BioScience*. - 2009. - 59(1). - P. 27-38. DOI: org/10.1525/bio.2009.59.1.7.

6.Ekasari, J. Improvement of biofloc quality and growth of *Macrobrachium rosenbergii* in biofloc systems by *Chlorella* addition / J. Ekasari, U.A. Nugroho, N. Fatimah, D. Angela, Y.P. Hastuti, G.S.J. Pande, F.M.I. Natrah // *Aquac. Int.* - 2021. - 29. - P. 2305-2317. DOI:10.1007/s10499-021-00750-1.

7.Islam, M. S. (2005). Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: review and analysis towards model development. *Marine Pollution Bulletin*, 50(1), 48–61.

8.Moreno, M.The use of nematodes in assessing ecological quality status in the Mediterranean coastal ecosystems / M. Moreno, F. Semprucci, Vezzulli L., Balsamo M., Fabiano M., Albertelli G. // *Ecological Indicators*, 2011.11(2). P. 328-336, DOI.org/10.1016/j.ecolind.2010.05.011

9.Rico A., Phu T. M., Satapornvanit K., Min J., Shahabuddin A.M., Patrik J.G et al. Use of veterinary medicines, feed additives and probiotics in four major internationally traded aquaculture species farmed in Asia // *Aquaculture*, 2013. № 412. P. 231-243, DOI: 10.1016/j.aquaculture.2013.07.028.

10.Rieger, A.M., & Barreda, D.R. (2011). Antimicrobial mechanisms of fish leukocytes. *Developmental & Comparative Immunology*, 35(12), 1238-1245

11.Silva C, Yáñez E, Martín-Díaz ML, Riba I, DelValls TA. Integrated ecotoxicological assessment of marine sediments affected by land-based marine fish farm effluents: physicochemical, acute toxicity and benthic community analyses // *Ecotoxicology*, 2013. № 22(6). P. 996-1011. DOI: 10.1007/s10646-013-1085-6.

12.Yano, T. The Nonspecific Immune System: Humoral Defense / T. Yano // *Fish Physiology* / eds. G. Iwama, T. Nakanishi. – San Diego: Academic Press, 1996. – Vol.

15. – P. 105-157. – ISBN 9780123504395. – DOI: 10.1016/S1546-5098(08)60273-3.
13. Карпенко Л. Ю., Полистовская П. А., Енукашвили А. И., Балькина А. Б. Влияние кадмия на показатели углеводного обмена у карпа // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2020. № 1. С. 239-240.
14. Методические указания по проведению гематологического обследования рыб" (утв. Минсельхозпродом России 02.02.1999 N 13-4-2/1487).
15. Юсефи, М. Применение лекарственных растений в аквакультуре / М. Юсефи, А.А. Никишов, Ю.А. Ватников, Е. В. Куликов. - СПб.: Лань, 2023. -140 с.
- REFERENCES**
1. Ahmad, M.T., Shariff, M., Yusoff, F.M., et al. (2020). Applications of microalga *Chlorella vulgaris* in aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, \*12\*(2), 328–346.
  2. Bureau, D.P., & Hua, K. (2010). Towards effective nutritional management of waste outputs in aquaculture, with particular reference to salmonid aquaculture operations. *Aquaculture Research*, \*41\*(5), 777–792.
  3. Cabello, F.C. (2006). Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture. *Environmental Microbiology*, \*8\*(7), 1137–1144.
  4. Dawood, M.A.O., Zommara, M., Eweedah, N.M., Helal, A.I., & Aboel-Darag, M.A. (2020). The potential role of nano-selenium and vitamin C on the performances of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07651-5>
  5. Diana, J.S. (2009). Aquaculture production and biodiversity conservation. *BioScience*, \*59\*(1), 27–38. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.1.7>
  6. Ekasari, J., Nugroho, U.A., Fatimah, N., Angela, D., Hastuti, Y.P., Pande, G.S.J., & Natrah, F.M.I. (2021). Improvement of bio-floc quality and growth of *Macrobrachium rosenbergii* in biofloc systems by *Chlorella* addition. *Aquaculture International*, \*29\*(2), 2305–2317.
  7. Islam, M.S. (2005). Nitrogen and phosphorus budget in coastal and marine cage aquaculture and impacts of effluent loading on ecosystem: Review and analysis towards model development. *Marine Pollution Bulletin*, \*50\*(1), 48–61.
  8. Moreno, M., Semprucci, F., Vezzulli, L., Balsamo, M., Fabiano, M., & Albertelli, G. (2011). The use of nematodes in assessing ecological quality status in the Mediterranean coastal ecosystems. *Ecological Indicators*, \*11\*(2), 328–336. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.05.011>
  9. Rico, A., Phu, T.M., Satapornvanit, K., Min, J., Shahabuddin, A.M., Patrik, J.G., et al. (2013). Use of veterinary medicines, feed additives and probiotics in four major internationally traded aquaculture species farmed in Asia. *Aquaculture*, \*412\*(2), 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.07.028>
  10. Rieger, A.M., & Barreda, D.R. (2011). Antimicrobial mechanisms of fish leukocytes. *Developmental & Comparative Immunology*, \*35\*(12), 1238–1245.
  11. Silva, C., Yáñez, E., Martín-Díaz, M.L., Riba, I., & DelValls, T.A. (2013). Integrated ecotoxicological assessment of marine sediments affected by land-based marine fish farm effluents: Physicochemical, acute toxicity and benthic community analyses. *Ecotoxicology*, \*22\*(6), 996–1011.
  12. Yano, T. (1996). The nonspecific immune system: Humoral defense. In G. Iwama & T. Nakanishi (Eds.), *Fish Physiology* (Vol. 15, pp. 105–157). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S1546-5098\(08\)60273-3](https://doi.org/10.1016/S1546-5098(08)60273-3)
  13. Karpenko, L.Yu., Polistovskaya, P.A., Enukashvili, A.I., & Balykina, A.B. (2020). Influence of cadmium on carbohydrate metabolism parameters in carp. *Issues of Regulatory Legal Framework in Veterinary Medicine*, (1), 239–240. [in Russian]
  14. Ministry of Agriculture and Food of Russia. (1999). Methodological guidelines for conducting hematological examination of fish (No. 13-4-2/1487). Moscow. [in Russian]
  15. Yusefi, M., Nikishov, A.A., Vatinikov, Yu.A., & Kulikov, E.V. (2023). The use of medicinal plants in aquaculture. Lan Publishing House. [in Russian]