4.2.6. Рыбное хозяйство, аквакультура и промышленное рыболовство (биологические науки)

doi:10.18286/1816-4501-2026-3-209-218
УДК 639.211.3.043.2

Кормовая полинутрицевтическая матрица как системный модулятор физиологических процессов при выращивании радужной форели в аквакультуре

Е. М. Романова✉**,** доктор биологических наук, профессор кафедры «Биология, экология, паразитология, водные биоресурсы и аквакультура»
В. Н. Любомирова, кандидат биологических наук**,** доцент кафедры «Биология, экология, паразитология, водные биоресурсы и аквакультура»
В. В. Романов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика»
А. К. Сибгатуллова, кандидат ветеринарных наук, доцент кафедры «Биология, экология, паразитология, водные биоресурсы и аквакультура»
ФБГОУ ВО Ульяновский ГАУ
432000, г Ульяновск, бульвар Новый Венец, зд.1
✉vvr-emr@yandex.ru

Резюме. В работе рассматривается концепция кормовой полинутрицевтической матрицы (КПМ) как модулятора физиологических процессов радужной форели в индустриальной аквакультуре. Актуальность исследования обусловлена поиском эффективных нутрицевтических решений повышения продуктивности, улучшения гематологических показателей, пищевой и биологической ценности, а также снижения уровня стресса у рыб с учётом требований к сбалансированности рациона по эссенциальным аминокислотам по нормативам ФАО/ВОЗ. Цель работы – оценить влияние КПМ на показатели крови, метаболические процессы, пищевую, биологическую и энергетическую ценность мяса радужной форели. В эксперименте сравнивали контрольную группу форели (n=30), потреблявшей традиционные корма, и опытную n=30, корм с добавлением КПМ. Гематологические показатели (эритроциты, лейкоциты, гематокрит, гемоглобин и др.) оценивали, основываясь на референсных диапазонах; пищевую ценность – по содержанию воды, белка, жира и традиционным коэффициентам, аминокислотный профиль оценивали через расчёт аминокислотного скора; уровень стресса – по концентрации кортизола в крови. В ходе работы использовали общепринятые методы исследований. Результаты показали достоверное улучшение гематологических показателей на фоне КПМ: содержание гемоглобина увеличилось с 8,02 до 11,8 г/дл, эритроцитов – с 0,98 до 1,16×10^6/мм³, тромбоцитов – с 25 до 39×10^6/мм³ ($p<0,05$), а все параметры выросли, стремясь к верхней границе нормы. Применение КПМ повысило долю белка в филе с 18,5 % до 21,5% и жира – с 5,1 % до 6,5 %, снизило влажность, увеличило валовую и истинную энергетическую ценность. Аминокислотный анализ обнаружил рост содержания незаменимых аминокислот и устранение дефицита метионина и триптофана на фоне КПМ. Уровень гормона стресса – кортизола на фоне КПМ снизился до нормы. Практическая значимость работы заключается в подтверждении эффективности КПМ для улучшения физиологического статуса и качества форели, произведенной в аквакультуре.
Ключевые слова: радужная форель, аквакультура, кормовая полинутрицевтическая матрица, модулятор, гематологические показатели, пищевая и биологическая ценность, аминокислотный скор, кортизол.
Для цитирования: Кормовая полинутрицевтическая матрица как системный модулятор физиологических процессов при выращивании радужной форели в аквакультуре / Е. М. Романова, В. Н. Любомирова, В. В. Романов и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 3 (75). С. 209-218. doi:10.18286/1816-4501-2026-3-209-218

Feed-based polynutraceutical matrix as a systemic modulator of physiological processes of rainbow trout reared in aquaculture

E. M. Romanova✉**, V. N. Lyubomirova, V. V. Romanov, A. K. Sibgatullova**
FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University
432000, Russia, Ulyanovsk, Novyi Venets Blvd., 1
✉vvr-emr@yandex.ru

Abstract. This paper examines the concept of a feed-based polynutraceutical matrix (FPM) as a modulator of physiological processes of rainbow trout reared in industrial aquaculture. The study is driven by the need to find effective nutraceutical solutions to enhance productivity, improve hematological parameters and nutritional/biological value, and reduce stress levels of fish, while ensuring dietary balance regarding essential amino acids in accordance with FAO/WHO standards. The aim of the study was to evaluate the effect of a feed additive based on microbial biomass (KPM) on blood parameters, metabolic processes, and the nutritional, biological and energy value of rainbow trout meat. The experiment compared a

control group of trout (n=30) fed with a standard diet with an experimental group (n=30) fed with a diet supplemented with KPM. Hematological parameters (erythrocytes, leukocytes, hematocrit, hemoglobin, etc.) were assessed taking into account reference ranges; nutritional value was determined based on water, protein, and fat content and standard coefficients; the amino acid profile was evaluated via the amino acid score; and stress levels were measured by blood cortisol concentration. Standard research methods were employed. The results demonstrated a significant improvement in hematological parameters with KPM supplementation: hemoglobin levels rose from 8.02 to 11.8 g/dL, erythrocytes from 0.98 to 1.16 × 10^6/mm³, and platelets from 25 to 39 × 10/mm³ ($p<0.05$), with all parameters trending toward the upper limit of the normal range. KPM supplementation increased the protein content in the fillet from 18.5% to 21.5% and fat content from 5.1% to 6.5%, while reducing moisture content and increasing both gross and true energy values. Amino acid analysis revealed an increase in essential amino acids and elimination of methionine and tryptophan deficiencies in the KPM group. Cortisol (stress hormone) levels decreased to the normal range with KPM supplementation. The practical significance of the study is to confirm the effectiveness and FPNM to improve the physiological status and quality of reared trout.
Keywords: rainbow trout, aquaculture, feed polynutraceutical matrix, modulator, hematological parameters, nutritional and biological value, amino acid score, cortisol.
For citation: Feed-based polynutraceutical matrix as a systemic modulator of physiological processes of rainbow trout reared in aquaculture / E. M. Romanova, V. N. Lyubomirova, V. V. Romanov, et al. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.3 (75): 209-218 doi:10.18286/1816-4501-2026-3-209-218

Работа выполнялась в рамках Федеральной программы «Кадры АПК»

Введение

Современная аквакультура сталкивается с фундаментальным противоречием: несмотря на наращивание объёмов производства, темпы роста продуктивности замедляются, а экономическая эффективность снижается. Ключевым ограничивающим фактором остаётся зависимость от традиционных высокобелковых компонентов - прежде всего рыбной муки и рыбьего жира [1].

Их использование исторически обосновано высоким содержанием незаменимых аминокислот и полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК), критически важных для роста и здоровья культивируемых видов рыб. Однако в последние десятилетия этот подход демонстрирует признаки исчерпания потенциала [2].

Во-первых, наблюдается стагнация показателей прироста при дальнейшем увеличении доли сырого протеина в кормах. Исследования показывают, что после достижения определённого порога (часто в диапазоне 45…55 % для хищных видов) дополнительный белок не конвертируется в прирост биомассы, а метаболизируется с повышенной нагрузкой на выделительную систему рыбы, что может приводить к ухудшению состояния здоровья и качества продукции [3, 4, 5].

Например, работы по кормлению радужной форели и атлантического лосося демонстрируют плато продуктивности при превышении уровня протеина свыше 50 %, при этом коэффициенты конверсии корма (FCR) ухудшаются [6].

Во-вторых, растёт себестоимость производства из-за удорожания базовых компонентов. Рыбная мука и рыбий жир – ресурсы с ограниченной доступностью, производство которых привязано к вылову дикой рыбы. По данным FAO и отраслевых аналитических отчётов, цены на рыбную муку в последние годы демонстрируют устойчивый рост, обусловленный как сокращением мировых запасов некоторых промысловых видов, так и повышением спроса со стороны растущего сектора аквакультуры. Это делает традиционные корма экономически невыгодными, особенно в условиях высокой конкуренции на продовольственном рынке [7].

В-третьих, экологическая устойчивость традиционной модели вызывает всё больше вопросов. Интенсивное использование рыбной муки косвенно способствует истощению морских экосистем, что противоречит принципам циркулярной экономики и ответственного производства. В результате отрасль вынуждена искать альтернативные стратегии, позволяющие сохранить высокую продуктивность при снижении зависимости от дорогостоящих и экологически чувствительных компонентов [8].

В последние годы в аквакультуре стал более четко прорисовываться тренд перехода от концепции «рост любой ценой» к производству рыбы как продукта функционального питания.

Параллельно с экономическими и экологическими вызовами меняется и парадигма потребительского спроса. Современный рынок смещается от модели «максимизация выхода продукции» к концепции создания функциональных продуктов питания, где ценность рыбы определяется не только её массой и содержанием белка, но и нутрицевтическим профилем -набором биологически активных веществ, полезных для здоровья человека.

Рыба в этом контексте рассматривается как вектор доставки нутрицевтиков: омега-3 жирных кислот (ЭПК и ДГК), незаменимых аминокилот, антиоксидантов, витаминов и других метаболически значимых соединений в организм человека.

Этот тренд подтверждается растущим интересом потребителей к продуктам с подтверждённой пользой для здоровья, а также развитием регуляторных рамок и стандартов, стимулирующих производство обогащённой продукции. В странах ЕС и Северной Америки активно развиваются программы сертификации и маркировки, подчёркивающие не только происхождение, но и функциональные свойства продуктов аквакультуры.

В России также наблюдается рост спроса на продукты с улучшенным нутриционным профилем, что открывает новые рыночные ниши для производителей, способных предложить не просто белок, а продукт с добавленной пользой.

С точки зрения науки такой подход требует переосмысления роли кормов: они должны не только обеспечивать базовые потребности в энергии и нутриентах, но и целенаправленно модулировать метаболизм рыбы для формирования желаемого состава тканей. Это означает в аквакультуре переход от «количественной» модели: больше белка –быстрее рост к «качественной» -оптимизированный состав рыбы – продукция премиум сегмента.

Согласно нашей рабочей гипотезе – целенаправленное использование кормовой полинутрицевтической матрицы (КПН), в состав которой мы введем комбинацию пробиотиков, адаптогенов, витаминов и незаменимых аминокислот в низких, но физиологически значимых дозах оказывает более выраженный эффект на продуктивность и качество продукции, чем традиционное наращивание уровня сырого протеина и липидов.

Логика этой гипотезы строится на нескольких ключевых механизмах:

Оптимизация усвоения питательных веществ. Пробиотики способны улучшать микробиом кишечника рыбы, повышая доступность и усвоение аминокислот и жирных кислот из корма. Это позволяет достигать тех же или лучших показателей роста при снижении общего уровня протеина [9-11].

Модуляция метаболических путей. Адаптогены и витамины способны влиять на гормональный фон и стрессовые реакции рыбы, снижая катаболизм белка и перераспределяя энергию на анаболические процессы [12-14]. В результате даже при меньшем поступлении белка с кормом его использование становится более эффективным [15-17].

Формирование целевого нутрицевтического профиля. Комбинированное воздействие на метаболизм позволяет увеличить содержание омега-3 ПНЖК в тканях, но и улучшить соотношение омега-3/омега-6, что является важным показателем функциональной ценности продукта [18-20].

Снижение метаболической нагрузки. Низкие дозы активных компонентов минимизируют риск токсического воздействия и побочных эффектов, обеспечивая устойчивый и предсказуемый результат [21].

Полинутрицевтическая матрица – это не добавка «сверху» на комбикорм, а инструментарий тонкой настройки метаболизма, позволяющий достичь синергетического эффекта. Вместо линейного увеличения ресурсов (белка и жира) предлагается системный подход, ориентированный на повышение эффективности их использования.

Цель работы – экспериментально обосновать системное регулирующее действие кормовой полинутрицевтической матрицы (КПМ) на физиологический статус радужной форели, установив взаимосвязь между индуцированными ею гематологическими сдвигами и качеством рыбной продукции

Материалы и методы

Для проведения исследований была отобрана здоровая форель весом 280…300 г одного возраста и размера, полученная для проведения эксперимента из фермерского хозяйства «Янтарный ручей», прошедшая месячную адаптацию в стандартных условиях индустриальной аквакультуры. Рыба содержалась в автономных рыбоводных модулях при температуре воды 16…18 С, содержание кислорода было на уровне 80…100 % насыщения, pH около 7,0. Эксперимент проводился при тех же параметрах среды обитания.

Из рыб, прошедших карантин и адаптацию, были сформированы экспериментальная и контрольная группы по 30 особей в каждой. Забор крови осуществляли под седацией, чтобы минимизировать стресс и избежать травмирования рыбы. С этой целью использовали гвоздичное масло (эвгенол) в концентрации 0,05 % до наступления стадии потери у рыб равновесия и снижения двигательной активности.

Для мечения рыбы использовали микрочипы. Кровь забирали из хвостовой вены для гематологии и микроядерного теста в вакуумные пробирки Lab-Vac с К3 ЭДТА, фиолетовая крышка, 2 мл, 13×75 мм, 143021375. Гематологические показатели определяли с использованием гематологического анализатора унифицированными методами.

Содержание белка, жира, воды в филе форели определяли в ОГБУ «Симбирский референтный центр ветеринарии и безопасности продовольствия» в соответствии с действующими ГОСТами.

В ходе работы рассчитывали белково-водный коэффициент (БВК). Он показывает, сколько граммов белка приходится на 100 г воды. Формула расчета:

БВК=(Б/В)×100, где:

Б – белок

В – вода

Для оценки пищевой ценности рассчитывали липидно-белковый коэффициент (Кж), он отражает соотношение жира и белка:

Кж=(Ж/Б), где:

Ж – содержание жира (липидов), %;

Б – содержание белка, %.

В работе рассчитывали коэффициент пищевой насыщенности (Кпн), он

характеризует плотность «сухих» питательных веществ относительно воды:

Кпн=(Б+Ж+У)/В, где:

Б – белок, %;

Ж – жир, %;

У – углеводы, % (для филе рыбы - У≈0);

В – вода, %.

Результат выражали или в долях единицы, или в процентах (умножив на 100).

Для характеристики пищевой ценности рассчитывали белково-водно - жировой коэффициент – КБВЖ. Расчет

КБВЖ=(Б+Ж)/В - для оценки пищевой ценности, где

Б – белок, %

Ж – жир, %

В – вода, %.

Аминокислоты определяли в мышечной ткани рыб на базе сертифицированной Учебно-научно-испытательной лаборатории по определению качества пищевой и сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова».

Определение аминокислотного состава проводили в филе рыбы по ГОСТ 31480-2012 «Комбикорма, комбикормовое сырье. Определение содержания аминокислот (лизина, метионина, треонина, цистина и триптофана) методом капиллярного электрофореза» и ГОСТ Р 55569-2013 «Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение протеиногенных аминокислот методом капиллярного электрофореза» (Аргинин, Лизин, Тирозин, Фенилаланин, Гистидин, Лейцин и изолейцин, Метионин, Валин, Пролин, Треонин, Серин, Аланин, Глицин, Глутаминовая кислота и глутамин, Аспарагиновая кислота и аспарагин, Цистин). Перед проведением анализа рыбу разделывали на филе, удаляли внутренние органы, шкуру и кости. Для анализа использовали гомогенизированное в блендере филе. Филе рыбы массой 150…200 г помещали в стакан емкостью 500 $см^3$ и перемешивали блендером на максимальных оборотах в течение 1 мин.

Градуировку проводили с использованием набора 18 L-аминокислот ООО «ЛюмехМаркетинг»: аланин (Ala), аргинин (Arg), аспарагиновая кислота (Asn), валин (Val), гистидин (His), глицин (Gly), глутаминовая кислота (Glu), лейцин(Leu), изолейцин (He), лизин (Lys), метионин (Met), пролин (Pro), серин (Ser), тирозин (Tyr), треонин (Thr), фенилаланин (Phe), цистин (Cys-Cys) -L-оптические изомеры).

Определение содержания триптофана проводили по ГОСТ 31480-2012.

Для каждой пробы записывали не менее двух электрофореграмм. Используя программное обеспечение, проводили идентификацию аминокислот с использованием градуировочной характеристики.

Аминокислотный СКОР рассчитывали общепринятым методом: AAS (Amino Acid Score) = (содержание аминокислоты в 1 г белка форели /содержание этой же аминокислоты в 1 г эталонного белка по ФАО/ВОЗ) × 100 % [22].

Определение кортизола проводили методом конкурентного иммуноферментного анализа (ELISA) с использованием коммерческого набора Salimetrics (State College, PA, USA). Определение проводили в трех повторностях. Для построения калибровочной кривой использовали стандартный раствор гормона. Чувствительность набора составляла менее 0,007 мкг/дл, диапазон детекции – 0,012…3,000 мкг/дл. Результаты выражали в нмоль/л (pg/mg) [23].

Полученные результаты были подвергнуты биометрической обработке с использованием традиционных критериев достоверности. Результаты считали достоверными при $p< 0,05$.

Результаты

На первом этапе исследований проводили оценку влияния кормовой полинутрицевтической матрицы (КПМ) на морфологические показатели крови радужной форели (табл. 1).

Применение кормовой матрицы существенно улучшило гематологические показатели; в частности, уровень эрироцитов повысился на 27,27 %, иммунокомпетентных клеток – лейкоцитов вырос – на 31,04 %, тромбоцитов – на 56 %, показатель гематокрита увеличился на 19,35 %, содержание гемоглобина – на 36,71 %. На фоне КПМ снизился средний объем эритроцитов , они стали более компактными – на 6,05 %, а внутриклеточное количество гемоглобина в них увеличилось на 7,38 %.

Таблица 1. Влияние кормовой полинутрицевтической матрицы (КПМ) на гематологические показатели радужной форели

Показатель крови	Референсные значения	Контроль	На фоне КПМ
Эритроциты (RBC)	1,01…2,04 × 10^6/мм³	1,1±0,05	1,4±0,08*
Лейкоциты (WBC)	25…60 × 10^3/мм³	39,63±0,77	48±0,95*
Гематокрит (Hct / PCV)	29…40%	31±1,4	37±2,1*
Средний объём эритроцита (MCV)	около 270 фл	281±6,2	264±5,7*
Общее количество внутриклеточного гемоглобина (MCH)	60…90 пг	71,8±5,3	77,1±6,8
Гемоглобин (Hb)	8,32…12,28 г/дл	7,9±0,37	10,8±0,42*
Тромбоциты (TC)	23,00…68,00 × 10^6/мм³	25±1,3	39±2,1*

*$p< 0,05$

Результаты исследований выявили позитивное влияние кормовой матрицы на индикаторные гематологические показатели радужной форели. На фоне КПМ выросло содержание гемоглобина и его общее количество в эритроците. Повысилось число эритроцитов, уровень лейкоцитов и тромбоцитов. Эти показатели до применения кормовой матрицы находилось на нижних границах нормы, а на ее фоне выросли.

На следующем этапе сопоставляли пищевую ценность мяса интактной форели и рыбы, получавшей КПМ. Данные опыта сравнивали с усредненными показателями для форели (табл. 2).

Применение кормовой матрицы повысило содержание белка в мясе форели – на 20,59 %, содержание жира – на 25,0 %, снизило обводненность филе – на 7,59 %; при этом белково-водный коэффициент вырос на 30 %, липидно-белковый – на 3,66. Пищевая ценность мяса рыбы также выросла, поскольку ее валовая и энергетическая ценность увеличились более, чем на 22 %

Таблица 2. Пищевая и энергетическая ценность филе у интактной форели и на фоне применения КПМ

Показатель	Усредненная норма	Контроль	На фоне КПМ
Вода, %	71…74	76±0,5	73±0,4*
Белок, %	19,0…21,0	18,5±0,2	21,5±0,3*
Жир, %	3,0…6,0	5,1±0,4	6,5±0,4*
Белково-водный коэффициент	0,27…0,29	0,24	0,29
Белково-водно-жировой коэффициент	0,25…0,27	0,23	0,27
Липидно-белковый коэффициент	0,15…0,24 0,15 – постная, 0,24 – жирная	0,28	0,30
Коэффициент пищевой насыщенности	<0,3 низконасыщ. сырьё; 0,3…0,6 средненасыщ. сырье >0,6 высоконасыщенное сырье	0,31	0,38
Категория рыбы по белку	высокобелковая, белок >19% белковая белок < 19%	белковая	высокобелковая
Категория рыбы по жиру	маложирная 3…5 % среднежирная 6…7%	маложирная	среднежирная
Qв, валовая энергетическая ценность, кДж на 100 г продукта	620…750	516,6	622,7
Qи, истинная энергетическая ценность, кДж на 100 г продукта	590…710	481,2	580,4
Qu, истинная энергетическая ценность, кКал на 100 г продукта	141…170	115,0	138,7

*p< 0,05

Результаты, отраженные в таблице 2, показывают, что применение КПМ в кормлении радужной форели повысило ее пищевую, биологическую ценность и качество филе; транформировало ее в категорию высокобелкового, среднежирного продукта, снизило уровень влажности филе, повысило валовую и истинную энергетическую ценность.

На следующем этапе работы проводился аминокислотный анализ мышечной ткани рыбы. Контрольная группа рыб получала традиционные корма для форели, а опытная – с добавлением КПМ. Было установлено, что на фоне применения кормовой матрицы уровень всех аминокислот по отношению к контролю вырос. Для нас основной интерес представляли эссенциальные аминокислоты, которые сам организм рыб не синтезирует. Результаты исследования содержания незаменимых аминокислот были выражены через СКОР и представлены на рисунке 1.

Для радужной форели незаменимыми считаются 10 аминокислот: валин, лизин; аргинин; метионин; треонин; лейцин; изолейцин; триптофан; гистидин; фенилаланин. Валин и изолейцин обычно хорошо сбалансированы в классических комбикормах, аргинин в достаточном количестве содержится в кормах на основе белка рыбной муки.

По данным литературы: лизин, аргинин, треонин, лейцин, триптофан лучше усваиваются на фоне пробиотиков, демонстрируя прирост [26].

По результатам наших исследований содержание метионина и триптофана (рис. 1) в мышцах рыб контрольной группы было пониженным, их уровень не соответствовал нормативу ФАО/ВОЗ, поэтому они являлись лимитирующими в аминокислотном СКОРе.

Для оценки влияния КПМ на уровень стресса исследовалось содержание кортизола в крови рыб, поскольку он рассматривается как индикатор стрессовой реакции. В аквакультуре у рыбы уровень кортизола более высокий, чем в природной среде, из-за влияния технологических факторов (освещение, плотность посадки и т.п.), молодая рыба менее стрессоустойчива, чем взрослая.

Уровень кортизола отличается большой вариабельностью и резко возрастает при манипуляциях. Чтобы минимизировать стресс, при взятии крови используют анестезию. Содержание кортизола быстро повышается за счёт активации гипоталамо-гипофизарно-интерренальной оси и уже через 1…3 минуты после начала манипуляций достигает 60…150 нмоль/л и выше. При высоких плотностях посадки уровень кортизола колеблется в диапазоне 30…80 нмоль/л. Также высокий уровень кортизола отмечается при перегреве, охлаждении, дефиците кислорода, достигая 100…200 нмоль/л, а при хроническом стрессе происходит истощении стресс-системы. Результаты наших исследований уровня кортизола приведены на рисунке 2.

Нами был обнаружен высокий уровень кортизола в контрольной группе 34±4,7 нмоль/л . В норме уровень гормона стресса у взрослых особей радужной форели составляет 10…20 нмоль/л [24].

В группе рыб, получавших КПМ, уровень кортизола был достоверно ниже на 35,29 % и составил 22±3,6 нмоль/л, поскольку в состав матрицы входит адаптоген – трекрезан. Высокий уровень гормона стресса у рыб в контрольной группе говорит о выраженной стрессовой нагрузке технологических факторов в индустриальной аквакультуре.

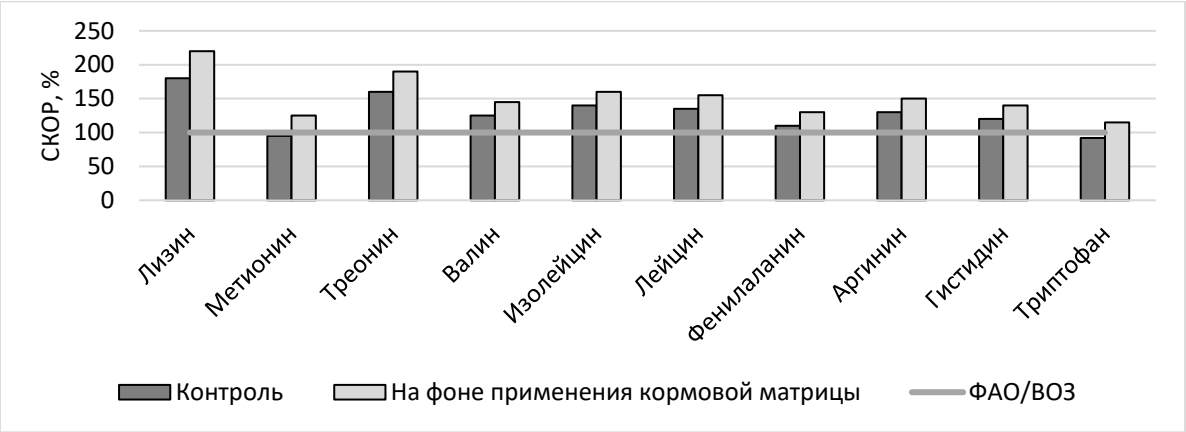


Рис. 1. Аминокислотный скор интактной радужной форели и на фоне КПМ.

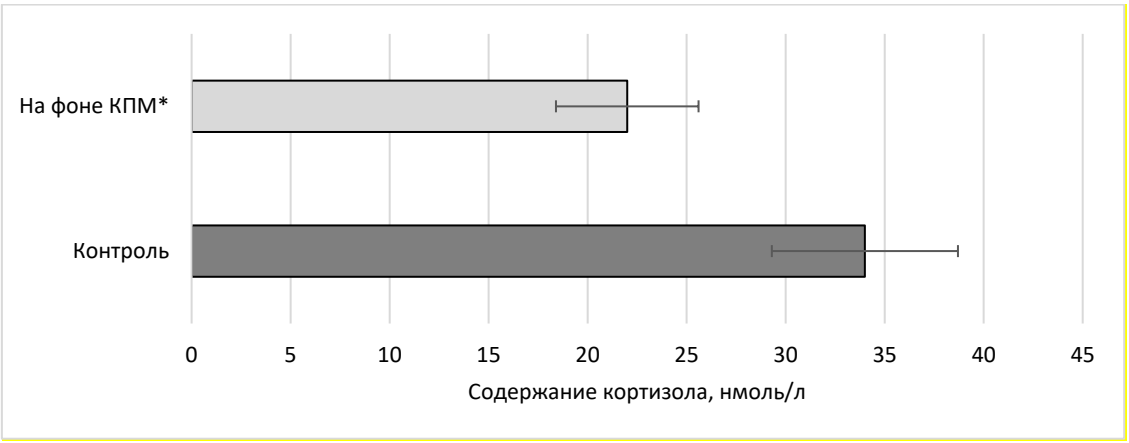


Рис. 2. Влияние КПМ на содержание кортизола в крови радужной форели в конце опыта

Обсуждение

Нами было выявлено позитивное влияние КПМ на многие гематологические, биохимические и показатели биологической и пищевой ценности радужной форели.

Было установлено, что на фоне КПМ достоверно выросло содержание эритроцитов и гемоглобина, гематокрит, содержание лейкоцитов и тромбоцитов. Эти показатели у рыбы до применения КПМ находились на нижних границах нормы. Наши результаты совпадают с данными других исследователей [25].

Известно, что основные компоненты мышечной ткани рыб, определяющие ее свойства и качество, – это белок, жир и вода. Вода определяет уровень влажности мяса рыб, ее повышенное содержание негативно влияет на вкус и на качество филе, при росте жирности рыбы ее содержание снижается [8].

Форель ценят за высокое содержание белка в мышцах. Использование КПМ повысило уровень белка до 21%, что позволило классифицировать рыбу как высокобелковый продукт. Синхронно выросло содержание жира в среднем с 5 % до 6,5 %. На фоне КПМ выросли белково-водный, белково-водно-жировой, липидно-белковый коэффициенты и коэффициент пищевой насыщенности. Также выросли валовая и истинная энергетическая ценность рыбы.

На следующем этапе работы при исследовании аминокислотного СКОРа было установлено, что все незаменимые аминокислоты, кроме метионина и триптофана в контрольной группе (интактная форель) были выше нормативов ФАО/ВОЗ. Метионин и триптофан оказались в дефиците.

Из-за «идеального» аминокислотного профиля рыбного белка даже небольшой дефицит одной незаменимой аминокислоты резко снижает усвоение остальных, это так называемый эффект «первой лимитирующей аминокислоты».

В нашей работе эту проблему успешно решило использование КПМ в большей мере за счет пробиотика в ее составе, действие которого было усилено адаптогенами и витаминно-аминокислотным комплексом.

Пробиотики *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* не только подавляют патогенную микрофлору, но и синтезируют экзогенные ферменты (протеазы, липазы). Это повышает коэффициент конверсии корма и высвобождает свободные аминокислоты для депонирования в мышцах.Поэтому у рыб экспериментальной группы, получавших КПМ, такого дефицита не выявлено. Синергетический комплекс кормовой матрицы, оптимизировав метаболизм, устранил дефицит эссенциальных АМК. Основную роль в этом сыграли пробиотики.

Наши результаты и выводы подтверждаются данными Niu et al. (2024), которые показали, что добавление пробитотика в корм для молоди форели, повышает усвояемость АМК, их уровень в сыворотке, влияет на экспрессию генов транспортных белков; на

фоне пробиотика СКОР «выравнивается», т.к. при одинаковом содержании АМК в корме их биодоступность растёт [26].

Оценим результативность использования КПМ для снижения уровня стресса в организме рыб. По нашим данным уровень стресса у рыб, получавших КПМ, снизился на 38 %.

У форели, получавшей кормовую матрицу, уровень кортизола был значительно ниже. Эффект матрицы проявился в стрессопротекторном действии. Можно полагать что механизм действия реализуется опосредованно в результате взаимодействия биологически активных компонентов КПМ: пробиотик+адаптоген + витаминно-аминокислотный комплекс оздоравливают организм рыб, нормализуют кишечный микробиоценоз, снижают системное воспаление и модулируют нейроэндокринные пути (ось «кишечник-мозг»), влияющие на выработку кортизола. Также есть основания полагать, что компоненты матрицы повышают уровень и доступность витаминов, аминокислот и других нутриентов, критически важных для нормальной работы эндокринной системы и адаптации к стрессу. Здоровая микробиота связывает или же нейтрализует токсины в кишечнике, снижая уровень стресса в организме рыб в целом. Полученные нами результаты снижения уровня кортизола свидетельствуют о росте благополучия рыбы, и о повышении рентабельности производства, поскольку хронический стресс, как известно, подавляет аппетит, замедляет рост рыбы и снижает конверсию корма.

Хронический стресс, сопровождающийся продолжительной гиперсекрецией кортизола, угнетает иммунную систему, повышая восприимчивость к болезням, а энтеральное поступление биологически активных веществ КПМ, снижая уровень гормонов стресса, опосредованно повышает резистентность рыбы, ее качество, органолептические и технологические свойства мяса. Общеизвестно, что более низкий уровень кортизола способствует получению более качественной продукции.

Наша оценка совпадает с точкой зрения других исследователей [8, 27]. Sorgeloos et al продемонстрировали, что оптимизация кормов – не только вопрос ресурсов, но и благополучия рыбы [8]. В этом плане разработанная нами КПМ может стать частью таких решений за счет новых, потенциально менее привычных кормовых ингредиентов.

Заключение

Сконструирована и апробирована в эксперименте кормовая полинутрицевтическая матрица (КПМ). Она представляет собой синергетическую смесь компонентов, в которой комплексный эффект превышает сумму эффектов ингредиентов. КПМ, включает пробиотик (Акваспорин) на основе штаммов *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* + адаптоген (Трекрезан) + витаминно-аминокислотный комплекс (Чиктоник).

Апробация КПМ на радужной форели показала, что на фоне ее применения улучшился комплекс гематологических показателей, таких как содержание эрироцитов, гемоглобина, содержание иммунокомпетентных клеток и тромбоцитов. В частности, содержание эритроцитов выросло на 27,27 %, лейкоцитов – на 31,04 %, уровень гематокрита – на 19,35 %, содержание гемоглобина – на 36,71 %, тромобицитов – на 56 %. Также снизился объем эрипроцитов – на 6,05 % и выросло количество гемоглобина в эритроцитах – на 7,38 %.

При оценке влияния КПМ на аминокислотный обмен было показано, что на фоне матрицы он интенсифицируется, демонстрируя позитивной рост показателей, в содержании незаменимых кислот восполнился дефицит лимитирующих аминокислот – гистидина и триптофана. На фоне КПМ их содержание выросло на 16,67 и 25,00 % соответственно, превысив уровень, обозначенный ФАО/ВОЗ. Уровень остальных незаменимых аминокислот вырос в среднем на 19, 29 %.

На фоне КПМ уровень стресса в организме рыб нормализировался. Под действием матрицы содержание гормона стресса – кортизола в крови рыб снизилось на 35,29 %, опустившись до верхних границ норма.

Было установлено, что КПМ оказывает позитивное влияние на пищевую, биологическую и энергетическую ценность рыбного филе. На ее фоне выросло содержания белка – на 20,59 %, жира – на 25,0 % в рыбе, снизилась обводненность филе – на 20,59 %, улучшились все показатели, характеризующие качество продукции, ее пищевую и энергетическую ценность. В частности, белково-водно-жировой коэффициент повысился на 27,92 %, а липидно – белковый – на 3,66. Более, чем на 22 % повысилась валовая и истинная энергетическая ценность мяса форели.

Полученные результаты убеждают в высокой эффективности разработанной полинутрицевтической матрицы для коррекции метаболических процессов в организме рыб с целью их оптимизации для повышения экономической эффективности аквакультуры.

Литература

1. Dietary protein requirements of fish - a meta-analysis / A. O. Teles, A. Couto, P. Enes, H. Peres // Reviews in Aquaculture. 2020. Vol. 12. P. 1445-1477. doi: 10.1111/raq.12391

2. Assessment of the energy and protein requirements for tambaqui (Colossoma macropomum, Cuvier 1818) using the factorial approach / G. W. Bueno, L. N. Oliveira, C. N. Souto, et al. // Aquaculture Reports. 2026. Vol. 48. Art. 103511. doi: 10.1016/j.aqrep.2026.103511

3. Bentley M. E., Phillips M.J. The effect of dietary protein level on growth, feed conversion and body composition in fish: a review// Aquaculture International. 2015. Vol. 23. No. 3. P. 457-476.

4. Apparent optimal dietary protein level and growth response of grow-out hybrid grouper

(Epinephelus akaara ♀ × E. lanceolatus ♂) under practical formulation conditions / T. Park, Y. H. Do, S.-M. Jeong, et al. // Animals. 2026. Vol. 16. No. 12. Art. 1878. doi: 10.3390/ani16121878

5. Dietary protein requirement of juvenile Tor sinensis based on growth performance, antioxidants, digestive enzyme activity and intestinal morphology / Y. Yang, T. Zhong, H. Ding, et al. // Animals. 2026. Vol. 16, No. 9. Art. 1284. doi: 10.3390/ani16091284

6. Lall S. P., Cowey C. J. Protein and amino acid requirements of fish: a review // Journal of Applied Aquaculture. 2002. Vol. 21. No. 1. P. 1-28. doi: 10.1111/j.1439-0426.1995.tb00019.x

7. Li X., Zheng S., Wu G. Nutrition and functions of amino acids in fish // Amino acids in nutrition and health / ed. by G.Wu. - Cham: Springer, 2021. Vol. 1285 (Advances in Experimental Medicine and Biology). P. 133-168. doi: 10.1007/978-3-030-54462-1_8

8. Sorgeloos P., Kaushik S. J., Tacon A G. J. Sustainable fish feeds: the challenge of reducing reliance on fishmeal // Aquaculture. 2003. Vol. 228. No. 1-4. P. 1-18

9. Shukry A. A., Abdel-Wahab M. A., El-Sayed A. A. The optimized inclusion level of Bacillus subtilis fermented Azolla pinnata in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) diets: immunity, antioxidative status, intestinal digestive enzymes and histomorphometry, and disease resistance // Fish Physiology and Biochemistry. 2022. Vol. 48. No. 4. P. 1077-1092. doi: 10.1007/s10695-022-01076-2.

10. Hoseinifar S. H. Doan H. V., Ashouri G. Galactooligosaccharide effects as prebiotic on intestinal microbiota of different fish species // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2019. Vol. 14. No. 3. P. 266-278.

11. Effect of dietary prebiotic inulin on growth, body composition and gut microbiota of Asian seabass (Lates calcarifer) / S. S. Ali, K. Ambasankar, S. Nandakumar, et al. // Animal Feed Science and Technology. 2016. Vol. 217. P. 87-94.

12.Влияние биологически активной кормовой добавки «Правад» на систему антиоксидантной защиты и аминокислотный состав мышечной ткани африканского клариевого сома / Л. А. Шадыева, Е. М. Романова, А. В. Васильев и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 3(63). С. 194-199. doi: 10.18286/1816-4501-2023-3-194-199

13. Оценка влияния генетического потенциала роста и природных адаптогенов на продуктивность и устойчивость популяций рыб / А. В. Линник, Э. В. Иванов, Е. В. Иванеха и др. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2000. № 4. С. 76-81.

14.The content of nutrients and biogenic elements in enriched artemia salina / E. Sveshnikova, E. Romanova, E. Fazilov, et al. // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2022), Divnomorskoe village, Krasnodar region, Russia, 26 сентября – 02 2022 года. Vol. 381. EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. P. 02023. doi: 10.1051/e3sconf/202338102023

15. The influence of the food factor on the components of the antioxidant protection system in fish / E. Romanova, V. Lyubomirova, V. Romanov, et al. // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, 01–03 марта 2023 года. Vol. 376. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. P. 02024. doi:10.1051/e3sconf/202337602024

16. Effectiveness of the Use of the Adaptogen Trekrezan in the Cultivation of African Catfish / E. Spirina, E. Romanova, L. Shadyeva, V. Romanov // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2021) : Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources, Kazan, 28-29 мая 2021 года. Vol. 37. Kazan: EDP Sciences, 2021. P. 00176. doi: 10.1051/bioconf/20213700176

17Use of a rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) intestinal in vitro platform to evaluate different diets/ F. Camin, N. Verdile, M.A. Chacon, et al. // Frontiers in Marine Science. 2025. Vol. 12. Art. 1576618. doi: 10.3389/fmars.2025.1576618

18. Evaluation of the content of polyunsaturated fatty acids in artemia at different stages of ontogenesis / E. Romanova, T. Shlenkina, V. Romanov, et al. // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, 01–03 марта 2023 года. Vol. 376. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. P. 02025. OI 10.1051/e3sconf/202337602025.

19. Влияние витамина с на жирнокислотный состав печени и мышц двухлеток сиговых рыб (Coregonidae), выращиваемых в условиях аквакультуры / И. Н. Остроумова, В. В. Костюничев, А. А. Лютиков и др. // Вопросы рыболовства. 2020. Т. 21. № 3. С. 343-352. doi: 10.36038/0234-2774-2020-21-343-352

20. Влияние витаминов Е и С на гематологические показатели и качество половых продуктов производителей осетровых рыб / Н. Н. Гадлевская, В. Д. Сенникова, И. Н. Селивончик и др. // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси. 2013. № 29. С. 120-126.

21. Михайлова, А. В., Кычанов В. М. Протекторное действие отдельных химических соединений на организм рыб // Естественные науки. 2017. № 4(61). С. 155-160.

22. Storebakken, T. Amino acid nutrition of salmonids: dietary requirements and bioavailability // Aquaculture International. 2025. Vol. 33. № 3. P. 457-472. doi: 10.1007/s10499-025-01841-z

23. Ataallahi M., Kim D.-W., Park G.-W., Park K.-H. Cortisol analysis in market-frozen rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) // Fisheries and Aquatic Sciences. 2026. Vol. 29. No. 6. P. 404–411. doi: 10.47853/FAS.2026.e35

24. Ghassemi Nejad, A., Bertotto, D., & Mazzi, D. Cortisol analysis in market-frozen rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) // Fisheries and Aquaculture. 2019. Vol. 29(6). P. 404–412. doi: 10.1016/j.fis.2019.06.003

25. Age and Sex Related Variations in Hematological Profile of Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) from Kashmir Aquaculture Systems / T. Latief, F. A. Bhat, T. H. Shah, et al. //Journal of Advances in Biology & Biotechnology. 2025. Vol. 28. No. 8. P. 1650-1661. doi: 10.9734/jabb/2025/v28i82835

26. The effects of using hydrolyzed feather meal, amino acids, and probiotics in the diet of juvenile rainbow trout on growth, digestibility, and expression of growth-related genes/ X. Niu, Y. Li, Y. Zhang, et al. // Aquaculture International, 2024. Vol. 32. 9671-9693. doi: 10.1007/s10499-024-01633-x

27. Performance, processing yields, and fillet composition of specific United States diploid and triploid rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) lines reared in a semi-commercial scale freshwater recirculating aquaculture system / C. Crouse, A. Knight, T. May, et al. // Aquaculture Reports. 2023. Vol. 33. P. 101794. doi: 10.1016/j.aqrep.2023.101794

References

1. Dietary protein requirements of fish - a meta-analysis/ A. O. Teles, A. Couto, P. Enes, H. Peres // Reviews in Aquaculture. 2020. Vol. 12. P. 1445-1477. doi: 10.1111/raq.12391

2. Assessment of the energy and protein requirements for tambaqui (Colossoma macropomum, Cuvier 1818) using the factorial approach / G. W. Bueno, L. N. Oliveira, C. N. Souto, et al. // Aquaculture Reports. 2026. Vol. 48. Art. 103511. doi: 10.1016/j.aqrep.2026.103511

3. Bentley M. E., Phillips M.J. The effect of dietary protein level on growth, feed conversion and body composition in fish: a review// Aquaculture International. 2015. Vol. 23. No. 3. P. 457-476.

4. Apparent optimal dietary protein level and growth response of grow out hybrid grouper (Epinephelus akaara ♀ × E. lanceolatus ♂) under practical formulation conditions / T. Park, Y. H. Do, S.-M. Jeong, et al. // Animals. 2026. Vol. 16. No. 12. Art. 1878. doi: 10.3390/ani16121878

5. Dietary protein requirement of juvenile Tor sinensis based on growth performance, antioxidants, digestive enzyme activity and intestinal morphology / Y. Yang, T. Zhong, H. Ding, et al. //Animals. 2026. Vol. 16, No. 9. Art. 1284.doi: 10.3390/ani16091284

6. Lall S. P., Cowey C. J. Protein and amino acid requirements of fish: a review // Journal of Applied Aquaculture. 2002. Vol. 21.No. 1. P. 1-28. doi: 10.1111/j.1439 0426.1995.tb00019.x

7. Li X., Zheng S., Wu G. Nutrition and functions of amino acids in fish // Amino acids in nutrition and health / ed. by G.Wu. - Cham: Springer, 2021. Vol. 1285 (Advances in Experimental Medicine and Biology). P. 133-168. doi: 10.1007/978 3 030 54462 1_8

8. Sorgeloos P., Kaushik S. J., Tacon A G. J. Sustainable fish feeds: the challenge of reducing reliance on fishmeal // Aquaculture. 2003. Vol. 228.No. 1-4. P. 1-18

9. Shukry A. A., Abdel Wahab M. A., El Sayed A. A. The optimized inclusion level of Bacillus subtilis fermented Azolla pinnata in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) diets: immunity, antioxidant status, intestinal digestive enzymes and histomorphometry, and disease resistance // Fish Physiology and Biochemistry. 2022. Vol. 48.No. 4. P. 1077-1092. doi: 10.1007/s10695 022 01076 2.

10. Hoseinifar S. H., Doan H. V., Ashouri G. Galactooligosaccharide effects as prebiotic on intestinal microbiota of different fish species // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2019. Vol. 14. No. 3. P. 266-278.

11. Effect of dietary prebiotic inulin on growth, body composition and gut microbiota of Asian seabass (Lates calcarifer) / S. S. Ali, K. Ambasankar, S. Nandakumar, et al. // Animal Feed Science and Technology. 2016. Vol. 217. P. 87-94.

12. Effect of the biologically active feed additive Pravad on the antioxidant defense system and amino acid composition of muscle tissue of the African sharptooth catfish / L. A. Shadyeva, E. M. Romanova, A. V. Vasiliev, et al. // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2023. No. 3(63). P. 194-199. doi: 10.18286/1816-4501-2023-3-194-199

13. Assessment of the influence of genetic growth potential and natural adaptogens on productivity and resistance of fish populations / A. V. Linnik, E. V. Ivanov, E. V. Ivanekha, et al. // Vestnik of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and Life Safety. 2000. No. 4. P. 76-81.

14. The content of nutrients and biogenic elements in enriched *Artemia salina* / E. Sveshnikova, E. Romanova, E. Fazilov, et al. // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Development and Modern Problems of Aquaculture” (AQUACULTURE 2022), Divnomorskoe village, Krasnodar region, Russia, September 26 – 02, 2022. Vol. 381. EDP Sciences: EDP Sciences, 2023. P. 02023. doi: 10.1051/e3sconf/202338102023

15. The influence of the food factor on the components of the antioxidant protection system in fish / E. Romanova, V. Lyubomirova, V. Romanov, et al. // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, March 01–03, 2023. Vol. 376. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. P. 02024. doi:10.1051/e3sconf/202337602024.

16. Effectiveness of the Use of the Adaptogen Trekrezan in the Cultivation of African Catfish / E. Spirina, E. Romanova, L. Shadyeva, V. Romanov // International Scientific-Practical Conference “Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources” (FIES 2021): Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources,

Kazan, May 28-29 2021. Vol. 37. Kazan: EDP Sciences, 2021. P. 00176. doi: 10.1051/bioconf/20213700176

17Use of a rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) intestinal in vitro platform to evaluate different diets/ F. Camin, N. Verdile, M.A. Chacon, et al. // Frontiers in Marine Science. 2025. Vol. 12. Art. 1576618. doi: 10.3389/fmars.2025.1576618

18. Evaluation of the content of polyunsaturated fatty acids in *Artemia* at different stages of ontogenesis / E. Romanova, T. Shlenkina, V. Romanov, et al. // E3S Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference “Environmental Risks and Safety in Mechanical Engineering” (ERSME-2023), Rostov-on-Don, Russia, March 1–3, 2023. Vol. 376. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2023. P. 02025. doi: 10.1051/e3sconf/202337602025.

19. The influence of vitamin C on the fatty acid composition of the liver and muscles of two-year-old whitefish (Coregonidae) reared in aquaculture conditions / I. N. Ostroumova, V. V. Kostyunichev, A. A. Lyutikov, et al. // Fishery issues. 2020. Vol. 21. No. 3. P. 343–352. doi: 10.36038/0234-2774-2020-21-343-352.

20. Effect of vitamins E and C on hematological parameters and the quality of reproductive products of sturgeon broodstock / N. N. Gadlevskaya, V. D. Sennikova, I. N. Selivonchik, et al. // Fishery issues of Belarus. 2013. No. 29. P. 120–126.

21. Mikhailova, A. V., & Kychanov, V. M. Protective effect of certain chemical compounds on the fish organism // Natural Sciences. 2017. No. 4(61). P. 155-160.

22. Storebakken, T. Amino acid nutrition of salmonids: dietary requirements and bioavailability // Aquaculture International. 2025. Vol. 33. No. 3. P. 457-472. doi: 10.1007/s10499-025-01841-z

23. Ghassemi Nejad, A., Bertotto, D., & Mazzi, D. Cortisol analysis in market-frozen rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) // Fisheries and Aquaculture. 2019. 29(6). P. 404-412. doi: 10.1016/j.fis.2019.06.003

24. Ghassemi Nejad, A., Bertotto, D., & Mazzi, D. Cortisol analysis in market-frozen rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) // Fisheries and Aquaculture. 2019. 29(6), 404–412. DOI: 10.1016/j.fis.2019.06.003

25. Age and Sex Related Variations in Hematological Profile of Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) from Kashmir Aquaculture Systems / T. Latief, F. A. Bhat, T. H. Shah, et al. // Journal of Advances in Biology & Biotechnology. 2025. Vol. 28, No. 8. P. 1650-1661. doi: 10.9734/jabb/2025/v28i82835

26. The effects of using hydrolyzed feather meal, amino acids, and probiotics in the diet of juvenile rainbow trout on growth, digestibility, and expression of growth-related genes / X. Niu, Y. Li, Y. Zhang, et al. // Aquaculture International, 2024. Vol. 32. 9671–9693. doi: 10.1007/s10499-024-01633-x.

27. Performance, processing yields, and fillet composition of specific United States diploid and triploid rainbow trout (Oncorhynchus mykiss) lines reared in a semi-commercial scale freshwater recirculating aquaculture system / C. Crouse, A. Knight, T. May, et al. // Aquaculture Reports. 2023. Vol. 33. P. 101794. doi: 10.1016/j.aqrep.2023.101794.