

**ВЛИЯНИЕ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ
КИСЛОТ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ, ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИЕ
И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РАДУЖНОЙ
ФОРЕЛИ *ONCORHYNCHUS (PARASALMO) MYKISS***

© 2026 г. С.В. Биндюков (spin: 5459–0085), Н.Ю. Терпугова (spin: 5485–9250),
М.В. Арнаутов (spin: 9454–3050), И.В. Бурлаченко (spin: 7492–7365)

ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО», Россия, Москва, 105187
E.mail: bindyukov@vniro.ru

Поступила в редакцию 19.03.2026 г.

Цель – характеристика индикаторных показателей крови радужной форели для оценки влияния на физиологический статус рыб различных соотношений полиненасыщенных жирных кислот в рационе питания. На основании анализа комплекса гематологических и биохимических показателей крови радужной форели установлены адаптивные возможности формирования высокого уровня метаболизма и иммунного статуса рыб при питании рационами с различным соотношением растительных масел и рыбьего жира, в т.ч. дефицитными по содержанию незаменимых длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот. Определены количественные характеристики уровня ввода растительных масел в корм, обеспечивающие сохранение и поддержание нормального физиологического статуса форели.

Ключевые слова: радужная форель, физиологическое состояние, гематологические показатели, биохимические показатели, рыбий жир, растительные масла, жирнокислотный состав, гемоглобин, АЛТ, АСТ.

ВВЕДЕНИЕ

Радужная форель (*Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*) является одним из ключевых объектов мировой аквакультуры и ценится за высокие темпы роста и пищевую ценность. Основой успешного выращивания служит сбалансированное кормление, где липидная составляющая комбикормов играет значительную роль. Рыбные жиры, богатые полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК), длинноцепочечными полиненасыщенными жирными кислотами (ДЦ–ПНЖК) омега–3, особенно эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК), являются условно-незаменимыми для лососевых рыб, напрямую влияя на их рост, развитие, физиологическое состояние, стрессоустойчивость и качество продукции (Биндюков и др., 2022).

Устойчивость традиционной модели аквакультуры, основанной на использовании рыбной муки и рыбьего жира в комбикормах, ставится под сомнение в условиях глобального сокращения запасов промысловых видов рыб – основного источника для производства этих ингредиентов. Рост объемов продукции аквакультуры и, как следствие, спроса на кормовые ресурсы, привел к их значительному удорожанию и создал серьезное давление на морские экосистемы. В связи с этим поиск и внедрение альтернативных, устойчивых источников в кормопроизводстве стали стратегической задачей глобального рыбного хозяйства (European Market..., 2025).

Растительные масла представляют собой наиболее доступную и экономически целесообразную альтернативу рыбьему жиру. Вопрос их применения не является новым и привле-

кал внимание специалистов еще в 80-х годах прошлого века (Щербина, Гамыгин, 2006). Различные растительные компоненты с успехом используются в современном комбикормовом производстве (Пахомов и др., 2022). При этом основной задачей является обеспечение высоких продукционных показателей (главным образом, быстрый набор массы тела) выращиваемых рыб. Однако метаболические и физиологические характеристики объектов выращивания, от которых зависит выживаемость рыб в условиях интенсивной индустриальной аквакультуры, детально не рассматриваются.

Масла таких культур, как лен и рапс, характеризуются высоким содержанием ПНЖК, преимущественно линолевой (ЛК, омега-6) и альфа-линоленовой (АЛК, омега-3) кислот. Ключевая проблема использования растительных масел заключается в значительном отличии их жирнокислотного профиля от рыбьего жира: они практически не содержат ЭПК и ДГК, а также имеют различное соотношение омега-3/омега-6 ПНЖК. Частичная или полная замена в комбикормах рыбьего жира растительными маслами неизбежно приводит к изменению липидного состава корма, что, в свою очередь, может оказывать комплексное воздействие на физиологические и метаболические процессы у рыб.

Это воздействие не ограничивается исключительно изменением жирнокислотного состава тканей и органов. Существуют потенциальные риски негативного влияния на структурно-функциональное состояние пищеварительного тракта, ключевые физиологические процессы – дыхание, осморегуляцию, общую резистентность организма. Тесная взаимосвязь физиологических процессов обуславливает то, что любая функциональная нагрузка на органы проявляется сдвигами в гематологических и биохимических параметрах крови. В силу этого данные параметры выступают ключевыми индикаторами гомеостаза организма.

В связи с этим, настоящее исследование было направлено на комплексную оценку гематологических и биохимических показате-

лей крови, как индикаторов физиологического статуса радужной форели при использовании рационов с частичной или полной заменой рыбьего жира на растительные источники ПНЖК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлась однополая форель радужная *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* (Walbaum, 1792) породы стальноголовой лосось «steelhead». Диплоидная икра поступила с племенного форелеводческого завода «Адлер», все особи являлись самками. Возраст рыб на момент начала эксперимента составлял 6 месяцев, средняя начальная масса 91 ± 2 г.

Изучение влияния полиненасыщенных жирных кислот растительного происхождения на физиологический статус форели, проводили с использованием экспериментальных диет. При их моделировании базировались на современных представлениях о потребностях рыб в питательных веществах с учетом специфики метаболизма радужной форели. В экспериментальных диетах изменяли только липидную составляющую за счет внесения разных соотношений рапсового, льняного масел – источников ЛК и АЛК и рыбьего жира – источника ЭПК и ДГК. В рецептах варьировали, как содержанием ДЦ-ПНЖК, так и соотношением ЛК и АЛК. Среднее содержание сырого протеина в комбикормах составляло 45,2 г/100 г корма, сырого жира 21,05 г/100 г корма.

В качестве контроля использовали корм, включавший только рыбий жир, как эталон соотношения жирных кислот, характерный для кормовой базы хищных рыб. Характеристика комбикормов, использованных в эксперименте представлена в таблице 1. Подробный анализ питательной ценности модельных рационов и рыбоводно-биологические результаты их применения рассмотрены в ранее опубликованной работе (Биндюков и др., 2025). Для удобства идентификации в шифре групп рыб, получавших комбикорма фигурирует расчетное значение суммы ЭПК и ДГК от 0,3 до 1,2 г/100г корма и соотношение

Таблица 1. Основная характеристика применяемых рационов и их названия

Шифр группы	Содержание жирных кислот в рационе, г/100г корма				Расчетное соотношение Омега-6/ Омега-3
	Линолевая к-та C18:2 n-6	Альфа- линолевая к-та C18:3 n-3	Эйкозапента- еновая к-та C20:5 n-3	Докозагексае- новая к-та C22:6 n-3	
КРФР 0.3 1/1	4,03	4,58	0,09	0,16	1:1
КРФР 0.3 1/2	3,70	7,61	0,11	0,16	1:2
КРФР 0.3 1/3	3,06	8,08	0,11	0,18	1:3
КРФР 1.2 1/1	3,32	3,80	0,43	0,71	1:1
КРФР 1.2 1/2	3,08	6,35	0,42	0,70	1:2
КРФР 1.2 1/3	2,70	8,45	0,43	0,70	1:3
КРФР РЖ	1,07	0,81	2,03	3,31	–

ЛК к АЛК. Контрольный корм носил название «КРФР РЖ».

Для эксперимента сформировали семь групп рыб (шесть экспериментальных и одну контрольную), по 160 особей каждая. Каждую группу содержали в отдельном бассейне объемом 1,2 м³ при начальной плотности посадки 11 кг/м³. Экспериментальное выращивание рыб проводили в течение 150 сут. в установке замкнутого водоснабжения (УЗВ) филиала по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ «ВНИРО» (ВНИИПРХ) (п. Рыбное, Дмитровский р-н, Московская обл.) со скоростью водообмена 1 м³/час; температура воды поддерживалась в диапазоне 15,8–16,7°C. Ключевые гидрохимические параметры (температура, растворенный кислород, рН, нитриты) контролировали дважды в сутки (8:00 и 16:00) с использованием стандартного оборудования (термометр, термооксиметр ОхуGuard Handy Polaris, рН-метр Hanna, тест-системы VladOx). Зафиксированные уровни растворенного кислорода составили 7,2–10,4 мг О₂/л, рН – 6,5–7,5, нитритов – не более 0,5 мг/л; все параметры соответствовали рекомендованным нормам для форели (Барулин, Лиман и др., 2016).

Гематологический анализ проведен согласно методическим указаниям (Методические указания..., 1999). Кровь отбирали из хвостовой вены от 10 экз. рыб (рис. 1) из

каждой группы в течение всего эксперимента на 30, 90, 150-е сут. Для определения уровня гемоглобина в крови применяли гемоглобинцианидный метод с использованием прибора МиниГЕМ-540. Для определения соотношения молодых и зрелых эритроцитов, а также лейкоцитарной формулы изготавливали мазки, которые окрашивали по методу Паппенгейма (фиксируют по Май-Грюнвальду и с последующим докрасиванием азур-эозином по Романовскому). Идентификацию клеток крови проводили по общепринятой классификации (Иванова, 1983) и атласу клеток крови лососевых рыб (Изергина и др., 2014). Подсчет лейкоцитов и тромбоцитов проводили в мазках крови методом относительного учета на 1000 эритроцитов с последующим выражением полученных значений в процентах.

Цитометрические показатели зрелых эритроцитов рассчитывали согласно методике, описанной в работе по морфометрическому анализу эритроидных гемоцитов (Soldatov et al., 2021). После фиксации мазков и получения микрофотографий проводили измерение линейных размеров 100 эритроцитов у каждой рыбы с помощью компьютерной программы ImageJ. Замеряли большой (C₁) и малый (C₂) диаметры эритроцита и их ядра (N₁, N₂) (рис. 2). Затем определяли объем эритроцита (V_c) (1), ядра (V_n) (2), толщину (h) (3) эритро-



Рис. 1. Процесс отбора крови для проведения гематологических и биохимических исследований.

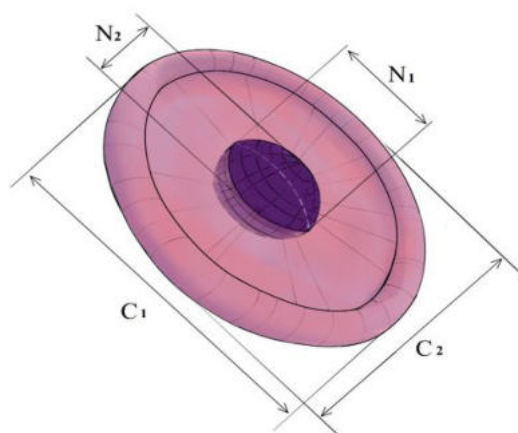


Рис. 2. Линейные размеры ядерных эритроцитов, измеряемые в работе (C_1 – большая ось клетки; C_2 – малая ось клетки; N_1 – большая ось ядра; N_2 – малая ось ядра).

цита, а также величину ядерно-плазматического отношения (ЯПО) (4).

Объем эритроцита:

$$V_c = 0,7012 \cdot \left(\frac{C_1 + C_2}{2} \right)^2 \cdot h + V_n, \quad (1);$$

Объем ядра:

$$V_n = \frac{\pi \cdot N_1 \cdot N_2^2}{6}, \quad (2);$$

Толщина клетки:

$$h = 1,8 + 0,0915 \cdot (C_1 - 7,5), \quad (3);$$

На основании значений V_c и V_n определяли величину ядерно-плазматического отношения (ЯПО):

$$\text{ЯПО} = \frac{V_n}{V_c}, \quad (4);$$

Для биохимического анализа кровь отбирали в специальные вакуумные пробирки с активатором свертываемости. Пробы центрифугировали в течение 10 мин. при 3000 об./мин, после чего отбирали сыворотку в объеме не менее 1,5 мл для каждой рыбы. Биохимические показатели, такие как общий белок, альбумин, аспартатаминотрансфераза (АСТ), аланинаминотрансфераза (АЛТ), креатинин, азот мочевины, глюкоза, триглицериды и холестерин, щелочная фосфатаза определяли с использованием биохимического автоматического анализатора BioChem FC-200 и готовых наборов реактивов от High Technology, Inc.

Статистическую обработку полученных данных выполняли с использованием пакета «StatSoft Statistica 10». Результаты представлены как ($M \pm SE$). Нормальность распределения оценивали в соответствии с критерием Шапиро-Уилка и тестом Левена. При нормальном распределении применяли параметрические критерии (ANOVA, тест Тьюки). В случае распределения, отличного от нормального, использовали непараметрические критерии (Краскела-Уоллиса). Различия считали значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Частичная или полная замена рыбьего жира в кормах не оказала существенного влияния на ростовые показатели, выживаемость и химический состав мышечной ткани радужной форели при длительном (150 сут.) использовании комбикормов с различными источниками липидов и их соотношением (Биндюков и др., 2025).

Оценка физиологического состояния рыб, получавших рационы с различным составом липидов, была начата с определения содержания гемоглобина в крови. По своей структуре гемоглобин является сложным белком, содержащим окрашенную простетическую группу. Он находится внутри эритроцитов и составляет около 32% от их массы. Основная функция гемоглобина – перенос кислорода от органов дыхания к тканям за счет образования легко диссоциирующих соединений с кислородом (Пищенко, 2002). Уровень гемоглобина относится к ключевым диагностическим маркерам. Его концентрация в крови изменяется под воздействием стрессогенных факторов, включая заболевания различной этиологии, в том числе и алиментарные, антропогенное загрязнение водной среды, дефицит растворенного кислорода (гипоксию).

Согласно литературным данным, дисбаланс в липидной составляющей пищи может вызывать снижение концентрации гемоглобина в крови, а также развитие дегенера-

тивных процессов в органах, участвующих в обмене липидов. В частности, у форели дефицит в питании незаменимых жирных кислот может быть инициатором комплекса патологических изменений (Rahkonen et al., 2013). В этой связи возможные изменения концентрации гемоглобина рассматривались, как индикатор нарушений транспортной функции крови и общего гомеостаза организма форели под воздействием дисбаланса липидов корма.

Динамика содержания гемоглобина в крови экспериментальных рыб на последовательных этапах эксперимента приведена на рисунке 3.

Диаграммы, приведенные на рисунке 3, показывают, что в течение опыта по кормлению форели экспериментальными комбикормами с различным уровнем ПНЖК, содержание гемоглобина в крови рыб изменялось. Через 30 сут. после начала опыта средние значения содержания гемоглобина варьировали в диапазоне 65–73,9 г/л. К 90-м суткам наблюдался умеренный рост показателей до 72,8–82,2 г/л, достигший максимума к 150 сут. эксперимента 89,6–99,8 г/л. Наблюдаемое нами повышение концентрации гемоглобина в крови согласуется с данными Lone и соавторов (2012), считающих, что подобное явление обусловлено увеличением массы тела рыб, и сопровождается усилением транспорта кислорода кровью для обеспечения возросших метаболических потребностей. По свидетельству Nabi и соавторов (2022) это достигается, за счет увеличения общей массы эритроцитов и концентрации гемоглобина, что и было зафиксировано в нашем эксперименте.

При рассмотрении влияния изменения липидного состава рациона на каждом этапе исследования можно видеть, что независимо от уровня ЭПК и ДГК в комбикормах 0,3 г/100 г или 1,2 г/100 г (опытные группы) или 5,34 г/100 г (контрольная группа) и соотношения ЛК/АЛК равным 1/1, 1/2, 1/3, значимое воздействие на концентрацию гемоглобина у рыб различных групп выявлено не было. На некоторых этапах фиксировали

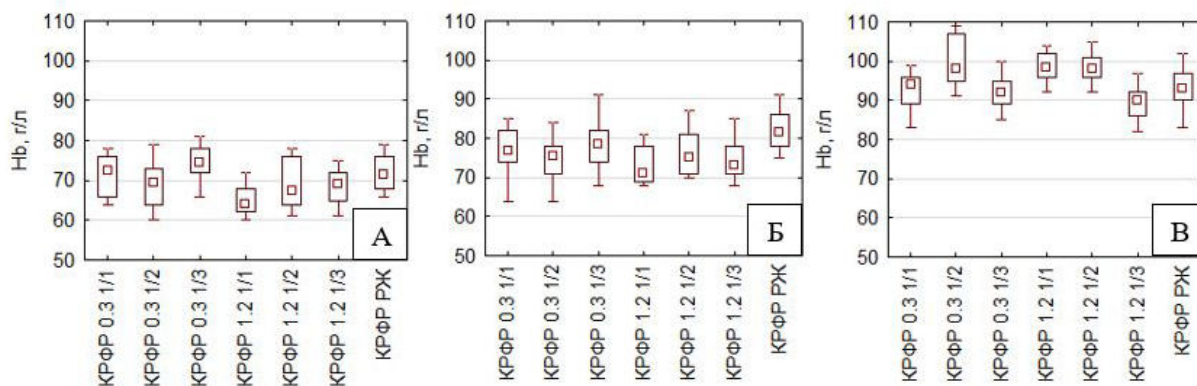


Рис. 3. Изменения содержания гемоглобина в крови форели радужной, получавшей корма с различным соотношением растительных липидов и рыбьего жира, г/л.: А – 30 сут. эксперимента, Б – 90 сут. эксперимента, В – 150 сут. эксперимента.

отдельные точечные различия, например, более низкое значение в группе КРФР 1.2 1/1 на 30-е сут. $65,0 \pm 1,32$ г/л по сравнению с контрольной группой. Однако эти различия не были устойчивыми и не прослеживались на следующих этапах эксперимента.

К 150-м суткам показатели концентрации гемоглобина у рыб всех групп находились на физиологически нормальном и сопоставимом между собой уровне, не отличаясь от контрольной группы (КРФР РЖ) – $93,3 \pm 1,69$ г/л. Наиболее высокое содержание гемоглобина за весь период эксперимента $99,8 \pm 1,95$ г/л было зафиксировано в группе рыб, получавших комбикорм КРФР 0.3 1/2 с самым низким уровнем суммы ЭПК и ДГК.

Необходимо также отметить, что уровень гемоглобина в крови форели, получавшей различные соотношения растительных липидов и рыбьего жира, на всех этапах выращивания в течение 150 сут., находился в пределах референсных значений 42–84 г/л для молоди (Lone et al., 2012) и 83,2–122,8 г/л для рыб, массой более 380 грамм (Nabi et al., 2022). Данное обстоятельство позволяет говорить о том, что в условиях наших опытов ключевым фактором, оказавшим заметное влияние на уровень гемоглобина в крови, являлся рост рыб, а не специфический липидный профиль корма.

Помимо содержания в крови гемоглобина, в качестве еще одного информативного

индикатора физиологического статуса рыб был рассмотрен морфометрический анализ клеток крови. Согласно литературным данным морфология клеток крови находится в тесной зависимости от интенсивности метаболических процессов и позволяет оперативно диагностировать острые токсикозы, возникающие, в том числе, на фоне дисбаланса в питании (Сементина, 2011; Серпунин, 2002). Эритроциты рыб, в отличие от эритроцитов млекопитающих, относятся к ядросодержащим клеткам, что обуславливает способность к транскрипции, трансляции и синтезу белка, т.е. активное участие в метаболизме. Форма и размеры клеток крови рыб являются интегральными параметрами, демонстрирующими строгую видоспецифичность (Okomoda et al, 2017) и корреляцию с динамикой онтогенеза (Bardhan et al., 2022). У диплоидной и триплоидной радужной форели наблюдаются различия в размерах клеток крови, у триплоидных рыб размеры эритроцитов и их ядер, а также нейтрофилов и моноцитов, могут быть примерно в 1,5 раза больше, чем у диплоидных особей. Эти различия позволяют использовать анализ размеров эритроцитов для идентификации триплоидных особей (Johari et al, 2008). Цитометрические характеристики эритроцитов в периферической крови рыб, получавших различные соотношения растительных и животных жиров представлены в таблице 2.

ВЛИЯНИЕ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

Таблица 2. Цитометрические параметры зрелых эритроцитов в крови радужной форели в течение эксперимента

Период	Клетка (эритроцит)				Ядро			ЯПО
	C_1 , мкм	C_2 , мкм	h, мкм	V_c , мкм ³	N_1 , мкм	N_2 , мкм	V_n , мкм ³	
КРФР 0.3 1/1								
30 суток	13,91±0,07	9,94±0,05	2,39±0,01	284,30±2,53	5,67±0,04	3,84±0,03	43,73±0,83	0,16
90 суток	15,11±0,09	10,31±0,06	2,50±0,01	351,35±3,19	6,69±0,04	4,32±0,03	66,03±0,99	0,19
150 суток	15,29±0,07	10,33±0,05	2,51±0,01	363,42±2,92	6,92±0,04	4,43±0,03	72,35±1,23	0,20
КРФР 0.3 1/2								
30 суток	15,04±0,10	10,19±0,07	2,49±0,01	340,32±3,88	6,53±0,06	4,18±0,04	60,41±1,25	0,18
90 суток	14,36±0,07	9,93±0,05	2,43±0,01	320,25±2,59	7,00±0,04	4,28±0,03	61,73±1,07	0,19
150 суток	15,76±0,09	10,32±0,06	2,56±0,01	371,04±3,35	6,79±0,04	4,20±0,03	63,75±1,09	0,17
КРФР 0.3 1/3								
30 суток	15,09±0,08	10,45±0,05	2,49±0,01	344,54±3,39	6,22±0,04	4,14±0,03	56,78±0,95	0,17
90 суток	15,20±0,10	9,95±0,06	2,50±0,01	346,42±3,98	6,89±0,04	4,24±0,03	65,60±1,01	0,19
150 суток	15,65±0,07	9,97±0,05	2,55±0,01	355,45±3,06	6,73±0,04	4,11±0,03	60,63±1,14	0,17
КРФР 1.2 1/1								
30 суток	14,36±0,09	9,28±0,05	2,43±0,01	327,83±3,29	6,45±0,04	3,98±0,04	56,72±1,29	0,17
90 суток	15,20±0,11	10,03±0,07	2,50±0,01	355,97±3,54	6,65±0,04	4,15±0,02	62,42±0,76	0,17
150 суток	15,52±0,09	10,11±0,07	2,53±0,01	361,95±3,92	6,90±0,05	4,28±0,04	67,92±1,59	0,19
КРФР 1.2 1/2								
30 суток	14,59±0,07	10,14±0,05	2,45±0,01	331,91±2,79	6,52±0,04	4,75±0,03	63,27±1,07	0,19
90 суток	15,11±0,10	10,08±0,06	2,48±0,01	358,09±3,22	6,34±0,05	4,46±0,03	66,60±0,83	0,18
150 суток	15,31±0,08	10,34±0,05	2,51±0,01	363,56±3,09	6,81±0,04	4,42±0,04	71,49±1,46	0,20
КРФР 1.2 1/3								
30 суток	14,73±0,07	9,77±0,04	2,36±0,01	310,59±2,49	6,17±0,03	3,12±0,02	49,91±0,62	0,17
90 суток	14,97±0,13	9,58±0,07	2,45±0,01	325,92±3,46	6,25±0,04	3,39±0,03	53,32±0,89	0,18
150 суток	15,02±0,08	9,92±0,05	2,49±0,01	335,79±2,81	6,72±0,04	4,18±0,03	62,72±1,29	0,19
КРФР РЖ								
30 суток	14,18±0,07	9,55±0,04	2,41±0,01	293,83±2,57	6,53±0,04	3,95±0,02	54,04±0,78	0,18
90 суток	14,51±0,07	10,00±0,05	2,44±0,01	328,58±2,80	6,87±0,03	4,38±0,03	69,90±1,04	0,19
150 суток	15,54±0,08	10,12±0,06	2,54±0,01	368,07±3,10	7,20±0,04	4,39±0,04	73,64±1,31	0,20

Примечание: C_1 – большой диаметр эритроцита; C_2 – малый диаметр эритроцита; h – толщина эритроцита; V_c – объем эритроцита; N_1 – большой диаметр ядра; N_2 – малый диаметр ядра; V_n – объем ядра; ЯПО – ядерно-плазматическое отношение (V_n/V_c).

После кормления опытными комбикормами с разным уровнем ПНЖК анализ линейного размера красных клеток крови показал увеличение большого и малого диаметра эритроцитов и их ядер, а также их объема у всех групп. Максимальные показатели объема кле-

ток и ядер выявлены на 150-е сут. При сравнении цитометрических характеристик эритроцитов между экспериментальными группами, увеличение значений отмечали у рыб группы КРФР 0,3 1/1, 0,3 1/2, 1,2 1/1, 1,2 1/2, которые были близки к контрольной группе КРФР РЖ.

Ядерно-плазменное отношение (ЯПО) эритроцитов характеризует соотношение количества цитоплазматического и ядерного материала. В крови обследованных рыб, ядерно-плазменное отношение колебалось, от 0,16 до 0,20. При этом у групп с минимальным уровнем ЭПК и ДГК на уровне 0,3 и соотношением ПНЖК 1/2 и 1/3 зафиксировано наименьшее ЯПО в конце эксперимента 0,17. Поскольку основным форменным компонентом цитоплазмы эритроцитов является гемоглобин, полученные данные позволяют предположить, что увеличение объема цитоплазмы относительно ядра эритроцита коррелирует с увеличением общего содержания гемоглобина в крови и это подтверждается описанными выше данными об уровне гемоглобина.

Полученные данные позволяют говорить, что использование кормов с различным уровнем ПНЖК не приводило к изменению цито-

метрических параметров эритроцитов. Это подтверждается тем, что размеры и морфометрические параметры эритроцитов во всех группах находились в пределах значений, характерных для костистых рыб и описанных в литературе (Силкин, 2019).

Для оценки функционального состояния кроветворной системы радужной форели из экспериментальных групп провели количественный анализ зрелых и незрелых эритроцитов (рис. 4А).

Их соотношение отражает активность эритропоэза, уровень кислородтранспортной функции крови и степень физиологической зрелости эритроцитарного профиля. Изменение соотношения клеток разной степени зрелости позволяет оценить адаптационные процессы организма, стабильность кроветворения, а также характеризует общее физиологическое состояние организма рыб (Nabi et al., 2022; Witeska et al., 2022; Witeska et al., 2023).

Полученные результаты, приведенные в таблице 3, показывают динамику распределения эритроцитарных форм во всех экспериментальных группах. Независимо от уровня суммы ЭПК и ДГК в рационе и соотношения ЛК/АЛК на 30-е сут. эксперимента у рыб

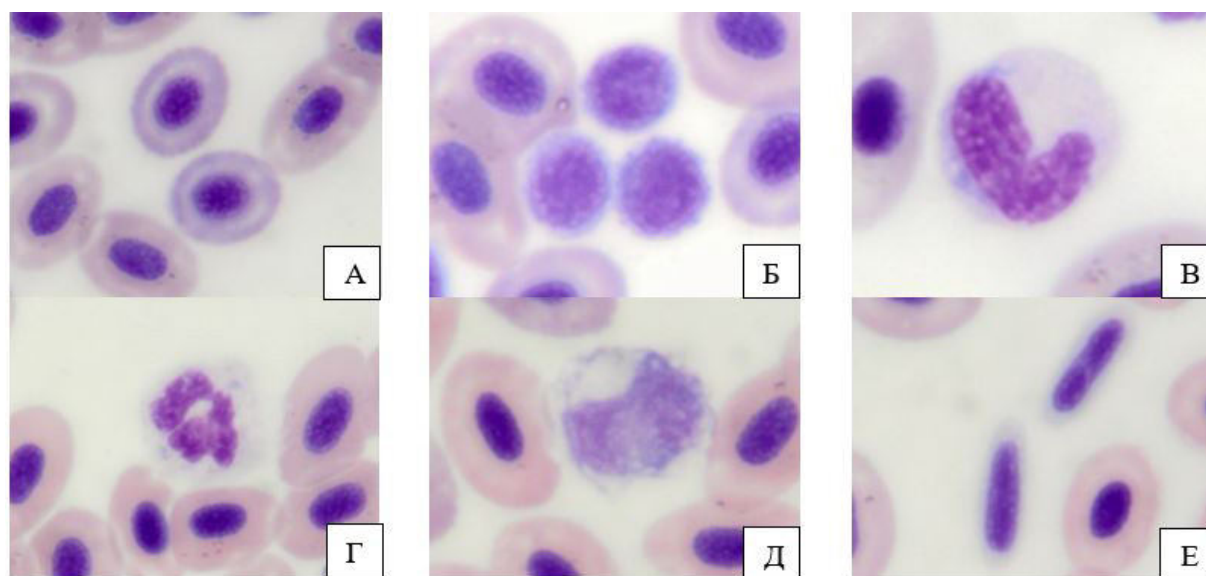


Рис. 4. Клетки крови радужной форели: А – зрелые и молодые эритроциты; Б – лимфоциты; В – палочкоядерный нейтрофил; Г – сегментоядерный нейтрофил; Д – моноцит; Е – тромбоциты. Ув. × 1000 Окраска по Паппенгейму.

всех групп наблюдалось закономерное преобладание зрелых эритроцитов: их содержание находилось в пределах 88,9–91,5%, тогда как доля незрелых форм варьировала от 8,5 до 11,1%. К 90-м сут. выращивания отмечалась дальнейшая положительная динамика: во всех экспериментальных вариантах доля зрелых эритроцитов увеличилась до 91,9–93,8%, что сопровождалось снижением количества незрелых форм до 6,2–8,1%. На 150-е сут. эксперимента доля зрелых эритроцитов достигала максимальных значений – 93,2–95,2%, при этом доля незрелых форм снизилась до 4,8–6,8%. Наибольшая доля зрелых эритроцитов зафиксирована у рыб, получавших рационы с повышенным уровнем суммы ЭПК и ДГК (1,2 г/100 г корма), в то время как минимальные значения отмечены в группе с уровнем 0,3 г/100 г и соотношением ЛК/АЛК 1/3. Контрольная группа, выращиваемая на корме с использованием рыбьего жира, занимала промежуточное положение. Последовательное увеличение количества зрелых эритроцитов во всех вариантах опыта по мере роста рыб, их относительное содержание, превышающее минимальные референсные значения, несмотря на имеющиеся различия между вариантами опыта, указывает на формирование зрелого и стабильного эритроцитарного состава крови и отсутствие влияния особенностей липидов рациона на функции снабжения организма кислородом.

Общеизвестно, что важнейшими индикаторными показателями крови, характеризующими нормальное или патологическое состояние организма, являются компоненты лейкоцитарной формулы. Соотношение лимфоцитов, нейтрофилов и моноцитов служит важным показателем функциональной активности лейкопоэза и отражает баланс между гуморальными и клеточными механизмами иммунитета. Изменения в содержании отдельных форменных элементов крови свидетельствуют о физиологической адаптации или напряжении защитных систем при воздействии факто-

ров внешней среды (Головина, Романова, 2019; Witeska et al., 2022; Nabi et al., 2022).

В аспекте изучения влияния содержания в кормах липидов различного происхождения на физиологический статус рыб необходимо отметить, что использованное в наших экспериментах рапсовое масло, обладает высоким уровнем ЛК, омега-6 ряда. ЛК метаболизируется в арахидоновую кислоту (АРК, C20:4 n-6) у лососевых рыб через ферменты дельта-6 и дельта-5 десатуразы. В испытаниях, где на атлантическом лососе испытывали корма с повышенным содержанием ЛК, было обнаружено увеличение производства АРК даже при одинаковых уровнях в кормах, что приводило к изменениям в липидном составе тканей и экспрессии генов, связанных с биосинтезом жирных кислот (Katan et al., 2019). Жирные кислоты ряда омега-3, поступающие в организм лососевых видов рыб в нативной форме либо продуцируемые при биосинтезе из предшественников в виде АЛК в ЭПК и ДГК (Биндюков и др., 2025), метаболизируются ферментами циклооксигеназой и липооксигеназой в эйкозаноиды. Эйкозаноиды активно вовлечены в регуляцию развития в организме воспалительных реакций (Caballero-Solares et al., 2024). В невоспаленных тканях уровень простагландинов обычно очень низок, но при остром воспалении он резко повышается (Meng et al., 2024).

В условиях наших опытов изменение липидных источников в экспериментальных рационах значительно повлияло на соотношения жирных кислот омега-3 и омега-6 ряда в комбикормах, а также уровни ЭПК и ДГК, конкурирующих с АРК, снижая доступность последней для синтеза провоспалительных эйкозаноидов. Таким образом, можно предположить, что изменение в липидном составе корма может повлиять на метаболический путь, регулирующий системное воспаление. В свою очередь, недостаток в пище тех или иных полиненасыщенных жирных кислот, может сопровождаться видимыми изменениями в лейкоцитарной формуле.

Таблица 3. Основные гематологические показатели крови радужной форели в течение эксперимента

Период	Наименование показателя	Группа рыб							Референсные значения*
		КРФР 0.3 1/1 ^А	КРФР 0.3 1/2 ^Б	КРФР 0.3 1/3 ^В	КРФР 1.2 1/1 ^Г	КРФР 1.2 1/2 ^Д	КРФР 1.2 1/3 ^Е	КРФР РЖЖ	
30 суток	Зрелые эритроциты	Эритропоэз, %							≥ 81,9
		91,3±0,2 ^{Б,Д,Е}	89,5±0,30 ^{А,Ж}	90,5±0,3	90,3±0,2	88,9±0,4 ^{А,Ж}	89,7±0,2 ^{А,Ж}	91,5±0,3 ^{Б,Д,Е}	
	Незрелые эритроциты	Лейкоцитарная формула, %							≤ 20,0
		8,7±0,2 ^{Б,Д,Е}	10,5±0,3 ^{А,Ж}	9,5±0,3	9,7±0,2	11,1±0,4 ^{А,Ж}	10,3±0,2 ^{А,Ж}	8,5±0,3 ^{Б,Д,Е}	
	Лимфоциты	Относительное содержание клеток крови (на 1000 эритроцитов), %							≥ 77,0
		90,3±0,7	91,4±0,8	92,7±0,6	92,5±0,5	90,2±0,7	90,0±0,7	90,3±0,8	
	Нейтрофилы	Эритропоэз, %							≤ 14,4
		6,8±0,4	5,8±0,6	5,2±0,5	5,4±0,5	6,7±0,4	6,7±0,6	7,0±0,7	
	Моноциты	Лейкоцитарная формула, %							≤ 4,9
		2,9±0,5	2,8±0,5	2,1±0,3	2,1±0,3	3,1±0,5	3,3±0,4	2,7±0,4	
Лейкоциты	Относительное содержание клеток крови (на 1000 эритроцитов), %							–	
	8,5±0,5 ^{Д,Е,Ж}	8,2±0,5 ^{Д,Е,Ж}	8,0±0,3 ^{Д,Е,Ж}	8,2±0,5 ^{Д,Е,Ж}	5,2±0,4 ^{А,Б,В,Г}	5,5±0,2 ^{А,Б,В,Г}	5,2±0,2 ^{А,Б,В,Г}		
Тромбоциты	Эритропоэз, %							–	
	0,9±0,1	0,8±0,1	0,5±0,2	0,9±0,1	0,7±0,2	0,5±0,1	0,9±0,1		
90 суток	Зрелые эритроциты	Эритропоэз, %							≥ 81,9
		92,2±0,3 ^Ж	91,9±0,2 ^{Ж,Е}	92,5±0,2	92,8±0,3	93,0±0,2	93,3±0,3 ^Б	93,8±0,2 ^{А,Б}	
	Незрелые эритроциты	Лейкоцитарная формула, %							≤ 20,0
		7,8±0,3 ^Ж	8,1±0,2 ^{Ж,Е}	7,5±0,2	7,2±0,3	7,0±0,2	6,7±0,3 ^Б	6,2±0,2 ^{А,Б}	
	Лимфоциты	Относительное содержание клеток крови (на 1000 эритроцитов), %							≥ 77,0
		92,4±0,5	91,8±0,3	92,3±0,6	92,8±0,8	92,6±0,6	92,2±0,6	92,5±0,5	
	Нейтрофилы	Эритропоэз, %							≤ 14,4
		5,2±0,4	5,9±0,3	5,0±0,4	5,2±0,6	5,2±0,4	5,1±0,5	4,8±0,4	
	Моноциты	Лейкоцитарная формула, %							≤ 4,9
		2,4±0,3	2,3±0,2	2,7±0,3	2,0±0,3	2,2±0,3	2,7±0,3	2,7±0,4	
Лейкоциты	Относительное содержание клеток крови (на 1000 эритроцитов), %							–	
	7,6±0,5 ^{В,Г}	6,6±0,6 ^{В,Г}	3,9±0,2 ^{А,Б}	4,2±0,4 ^{А,Б}	5,3±0,6	5,6±0,2	5,4±0,4		
Тромбоциты	Эритропоэз, %							–	
	1,2±0,1 ^В	0,8±0,1	0,5±0,1 ^А	1,0±0,1	0,7±0,2	1,3±0,2	1,0±0,1		
150 суток	Зрелые эритроциты	Эритропоэз, %							≥ 81,9
		93,8±0,3	94,2±0,3	93,2±0,3 ^Е	94,3±0,4	94,8±0,3	95,2±0,5 ^В	94,8±0,3	
	Незрелые эритроциты	Лейкоцитарная формула, %							≤ 20,0
		6,2±0,3	5,8±0,3	6,8±0,3 ^Е	5,7±0,4	5,2±0,3	4,8±0,5 ^В	5,2±0,3	
	Лимфоциты	Относительное содержание клеток крови (на 1000 эритроцитов), %							≥ 77,0
		92,2±0,7	90,1±1,0	93,0±0,6	92,2±0,4	92,9±0,7	91,8±0,6	92,9±0,7	
	Нейтрофилы	Эритропоэз, %							≤ 14,4
		5,2±0,4	6,4±0,6	5,0±0,4	5,6±0,6	5,0±0,5	6,1±0,6	5,1±0,6	
	Моноциты	Лейкоцитарная формула, %							≤ 4,9
		2,6±0,4	3,5±0,5	2,0±0,4	2,2±0,4	2,1±0,3	2,1±0,4	2,0±0,3	
Лейкоциты	Относительное содержание клеток крови (на 1000 эритроцитов), %							–	
	3,5±0,4	3,9±0,4	3,6±0,2	3,2±0,3	2,6±0,1	3,5±0,5	3,1±0,2		
Тромбоциты	Эритропоэз, %							–	
	0,7±0,1	0,5±0,2	0,5±0,1	1,1±0,1	0,8±0,1	1,1±0,1	0,8±0,2		

Примечание: Показатели с разными буквенными индексами (^{А,Б,В,Г,Д,Е,Ж}) достоверно различаются между собой на уровне $p < 0,05$, на одном этапе эксперимента; * – Серпунин, 2010; Головина, Романова, 2019; Конькова и др., 2023.

Данные таблицы 3 свидетельствуют, что лейкоцитарная формула крови радужной форели во всех экспериментальных группах на протяжении всего периода исследований характеризовалась преобладанием лимфоцитов.

На 30-е сут. эксперимента межгрупповых различий в структуре лейкоцитарной формулы отмечено не было. Доля лимфоцитов находилась в пределах 90,0–92,7%, нейтрофилов – 5,2–7,0%, моноцитов – 2,1–3,3%, указывающая на сходное функциональное состояние иммунной системы у рыб всех групп на начальном этапе. К 150-м сут. выявлены отдельные статистически значимые межгрупповые различия по содержанию лимфоцитов. Максимальное значение зарегистрировано у рыб группы КРФР 0.3 1/3 ($93,0 \pm 0,6\%$), тогда как минимальное – в группе КРФР 0.3 1/2 ($90,1 \pm 1,0\%$). При этом содержание нейтрофилов (5,0–6,4%) и моноцитов (2,0–3,5%) между группами оставалось стабильным и не демонстрировало выраженной варибельности. Отсутствие смещения лейкоцитарного профиля в сторону гранулоцитарных или моноцитарных форм свидетельствует об отсутствии патологических сдвигов в иммунном статусе у радужной форели в условиях эксперимента. Стабильное преобладание лимфоцитов у рыб во всех экспериментальных группах отражало сохранение функционального равновесия иммунной системы.

В течение экспериментального периода общее количество лейкоцитов в крови радужной форели демонстрировало отчетливую возрастную динамику. На 30-е сут. их содержание изменялось в пределах 5,2–8,5%, к 90-м сут. снижалось до 3,9–7,6%, а к 150-м суткам достигало минимальных значений – 2,6–3,9%. Во всех группах прослеживалась устойчивая тенденция к уменьшению общего числа лейкоцитов по мере роста рыб, что, вероятно, отражает возрастную перестройку иммунного статуса и постепенную стабилизацию процессов лейкопоэза (табл. 3).

Таким образом, различные вариации в жирнокислотном составе липидного профиля

экспериментальных рационов не привели к изменению содержания лейкоцитов у радужной форели.

Относительное содержание тромбоцитов, количество и функциональная активность которых отражают способность организма поддерживать сосудистый гомеостаз, отвечать на микроповреждения тканей и регулировать свертывающие процессы, у подопытных рыб в течение эксперимента характеризовалось умеренными колебаниями без выраженной направленной динамики. На 30-е сут. показатель находился в пределах 0,5–0,9 %, к 90-м суткам варьировал в диапазоне 0,5–1,3%, а к 150-м суткам составлял 0,5–1,1 % (табл. 3). Сравнительный анализ также не выявил значимых различий по уровню тромбоцитов между экспериментальными группами на всех сроках исследования. Согласно данным литературы, физиологические колебания уровня тромбоцитов, отмеченные нами в динамике опыта, могут быть интерпретированы как проявление адаптационных механизмов кроветворения и нормальной реакции системы свертывания (Witeska et al., 2023; Ferdous, Scott, 2023). В этой связи применительно к условиям наших опытов (при отсутствии установленных референсных значений для относительного подсчета тромбоцитов у форели), полученные результаты говорят о стабильном функциональном состоянии системы гемостаза и отсутствии патологических сдвигов, связанных с применением экспериментальных рационов.

Биохимические показатели крови являются чувствительными индикаторами физиологического состояния организма, отражающими функциональную активность печени, почек и общее направление метаболических процессов. Комплексное изучение биохимических параметров позволяет не только выявить возможные негативные эффекты, но и подтвердить способность радужной форели адаптироваться к изменениям жирнокислотного профиля корма без ущерба для здоровья и обменных процессов. Поэтому анализ биохимических показателей крови при замене

рыбьего жира растительными маслами может быть использован для оценки безопасности и физиологической допустимости использования альтернативных источников липидов.

Результаты биохимического анализа крови радужной форели по окончании эксперимента в сопоставлении с контрольным диапазоном референсных значений приведены в таблице 4.

Альбумин и общий белок являются маркерами белкового обмена и отражают функциональное состояние печени, которая могла быть подвержена изменениям метаболической нагрузки, связанным с различиями в липидном составе кормов. Наблюдаемые в конце опыта значения этих показателей свидетельствуют, что концентрация альбумина в плазме крови статистически различалась между группами, однако значения показателя во всех случаях находились в пределах физиологического диапазона, описанного для радужной форели (11,68–25,27 г/л) (Rozas-Serri et al., 2022). Уровень общего белка, так же достоверно различался между экспериментальными группами. Наибольшие значения отмечены в контрольной группе КРФР РЖ – 63,4 г/л, тогда как в вариантах с частичной заменой рыбьего жира показатель был ниже, группы с полной заменой рыбьего жира занимали промежуточное положение. Во всех случаях общий белок находился в диапазоне, описанном для радужной форели (25,67–64,91 г/л) (Rozas-Serri et al., 2022), что указывает на отсутствие изменений в белковом обмене на фоне замены источника липидов. Эти наблюдения согласуются с данными, согласно которым замена рыбьего жира растительными маслами в большей степени влияет на маркеры липидного обмена (холестерин, триглицериды), чем на показатели белкового обмена (Richard et al., 2006).

В свою очередь, уровень холестерина в плазме достоверно отличался под влиянием исследуемого фактора. При этом полученные значения (4,8–7,2 ммоль/л) соответствовали референс-интервалу, установленному для клинически здоровых особей радужной

форели (3,4–11,0 ммоль/л) (Řehulka, Minařík, 2012). В опытных группах, где доля рыбьего жира была минимальной или он отсутствовал, уровень холестерина был несколько ниже, чем в контрольной группе. Самый высокий уровень холестерина отмечен в группе получавший корм, включающий в качестве липидной составляющей 100% рыбьего жира, и равнялся 7,81 ммоль/л. В исследовании (Lazzarotto et al., 2018) аналогичные изменения объяснялись ограничением экзогенного холестерина, которого значительно больше в рыбьем жире, чем в растительных маслах и изменением активности ферментов его эндогенного синтеза на фоне кормления растительными жирами.

Концентрация триглицеридов имела аналогичную тенденцию: более высокие уровни у рыб контрольной группы и постепенное уменьшение показателя у групп с минимальным содержанием рыбьего жира. При этом диапазон полученных значений (4,94–7,07 ммоль/л) сопоставим с литературными данными по норме для радужной форели, варьирующей от 2,4 до 14,4 ммоль/л (Řehulka, Minařík, 2012), и согласно экспериментальным данным других авторов физиологичен для радужной форели (Kostyniuk et al., 2018). Поскольку триглицериды являются индикатором энергетического статуса и интенсивности липидного обмена, полученные данные свидетельствуют о разнице между группами рыб, получавшими растительные масла или рыбий жир. Анализ уровня триглицеридов крови рыб получавшей контрольный корм – КРФР РЖ с значительно более высоким уровнем ЭПК и ДГК, которые влияют на ресинтез триглицеридов в процессе липолиза, выявил достоверно повышенное содержание триглицеридов 7,07 ммоль/л, что на 56% больше, чем у рыб группы КРФР 0,3 1/1, которые питались кормом без рыбьего жира.

Интерпретировать полученный результат можно двояко. Повышенный уровень триглицеридов в контрольной группе может свидетельствовать о более активном липогенезе – процессе синтеза жиров. Рыбий жир, богатый ДЦ–ПНЖК, может эффективнее метаболизи-

Таблица 4. Биохимические показатели сыворотки крови форели в конце эксперимента

Наименование показателя	Группа рыб							Референсные значения (min-max)
	КРФР 0.3 1/1 ^A	КРФР 0.3 1/2 ^B	КРФР 0.3 1/3 ^B	КРФР 1.2 1/1 ^Г	КРФР 1.2 1/2 ^Д	КРФР 1.2 1/3 ^Е	КРФР РЖ ^Ж	
Альбумин, г/л	18,82±0,49 ^Е	18,22±0,36 ^{Е,Ж}	18,59±0,32 ^Е	19,36±0,43 ^Е	19,8±0,37	21,24±0,38 ^{А, Б, В, Г}	20,26±0,61 ^Б	11,68–25,27 ⁽¹⁾
Щелочная фосфатаза, ед/л	123,6±3,12	116,2±2,68	114,9±2,31	121,1±1,21	124,4±2,2	118±2,97	125,2±1,97	65,2–205,42 ⁽²⁾
АЛТ, ед/л	8,3±0,5	8,9±0,62	8,2±0,51	8,4±0,64	8,8±0,59	8,0±0,37	8,7±0,5	3,00–11,08 ⁽¹⁾
АСТ, ед/л	377,2±7,35 ^Ж	364,2±6,25	363,9±9,52	371,9±5,98	364,8±7,93	388,7±10,43 ^Ж	341,8±5,27 ^{А, Е}	234,6–712,8 ⁽²⁾
Азот мочевины, ммоль/л	2,33±0,12	2,49±0,14	2,46±0,11	2,58±0,13	2,51±0,13	2,67±0,12	2,44±0,09	0,56–2,89 ⁽²⁾
Холестерин, ммоль/л	5,39±0,2	5,18±0,22	5,66±0,26	5,68±0,22	5,48±0,23	6,21±0,39	7,81±0,26 ^{А, Б, В, Г, Д, Е}	3,4–11,0 ⁽³⁾
Креатинин, ед/л	53,5±1,91	55,3±1,5	56,7±1,37	54,8±1,44	57,7±0,99	56,8±1,1	55±1,06	22,1–66,19 ⁽¹⁾
Глюкоза, ммоль/л	2,75±0,08 ^Ж	2,61±0,1 ^Ж	3,01±0,11	2,78±0,12	3,02±0,11	2,6±0,13 ^Ж	3,31±0,21 ^{А, Б, Е}	1,66–4,28 ⁽⁴⁾
Общий белок, г/л	55,2±1,21 ^{Д, Ж}	53,4±1,06 ^Д	58,67±0,98 ^{Г, Д, Е}	50,42±1,27 ^{В, Ж}	48,49±1,7 ^{А, В, Ж}	52±1,53 ^{Б, Ж}	63,4±1,51 ^{А, Б, Г, Д, Е}	25,67–64,91 ⁽¹⁾
Триглицериды, ммоль/л	4,94±0,19	5,04±0,18	5,24±0,19	5,73±0,25	5,06±0,14	5,77±0,2	7,07±0,22 ^{А, Б, В, Г, Д, Е}	2,4–14,4 ⁽⁵⁾

Примечание: Показатели с разными буквенными индексами (А,Б,В,Г,Д,Е,Ж) достоверно различаются между собой на уровне $p < 0,05$.

(¹) – Rozas-Serri et al., 2022, (²) – Nabi et al., 2022, (³) – Keitel-Gröner et al., 2025, (⁴) – Fazio et al., 2021, (⁵) – Řehulka, Minařík, 2012.

роваться и служить субстратом для синтеза эндогенных липопротеинов очень низкой плотности, которые транспортируют триглицериды в кровотоки (Liu et al., 2021).

С другой стороны, повышенные значения уровня триглицеридов могут указывать на сниженную скорость утилизации липопротеидов периферическими тканями. Если механизмы липолиза или поглощения жирных кислот мышцами и другими органами нарушены или менее эффективны, это приводит к их накоплению в крови. В этом контексте высокий уровень является не признаком активного метаболизма, а индикатором потенциальной перегрузки липидного обмена. В связи с тем, что влияние на рыбоводно-биологические показатели (скорость роста) отмечено не было, можно предположить, что такие уровни не повлияли

на глобальный энергетический обмен и не изменили ростовой потенциал рыб.

Изучение концентрации глюкозы в плазме крови экспериментальных рыб продемонстрировало статистически достоверные межгрупповые различия ($p < 0,05$). При этом значимое повышение уровня глюкозы выявлено только в контрольной группе по сравнению с группами КРФР 0.3 1/2, КРФР 1/1 и КРФР 1.2 1/3 ($p < 0,05$). Все значения содержания глюкозы находились в пределах физиологической нормы для радужной форели (1,66–4,28 ммоль/л), что согласуется с опубликованными данными (Fazio et al., 2021) и подтверждает нормальное состояние углеводного обмена рыб при варьировании состава липидных компонентов.

Показатель креатинина в плазме крови радужной форели не имел достоверных меж-

групповых различий ($p > 0,05$), несмотря на варьирование источника липидов. Все значения находились в пределах физиологического диапазона, описанного для вида (22,1–66,19 мкмоль/л), что свидетельствовало об отсутствии нарушений почечно-экскреторной функции и метаболического стресса, и подтверждает безопасность замены рыбьего жира растительными маслами с точки зрения поддержания нормального уровня процессов азотистого обмена.

Величина концентрации азота мочевины, также не имела достоверных межгрупповых различий. Полученные значения располагались в относительно узком диапазоне между группами, что указывает на сохранение стабильного азотистого обмена при замене рыбьего жира растительными маслами и при частичном включении рыбьего жира. Известно, что данный показатель у лососевых более чувствителен к гидрохимическим параметрам воды, чем к составу комбикорма (Davidson et al., 2014).

Активность щелочной фосфатазы варьировала в пределах 114,9–125,2 ед/л и достоверно не различалась между экспериментальными группами. При этом все значения находились в референсном диапазоне, установленном для форели, который по данным (Nabi et al., 2022) составляет 65,2–205,4 ед/л. Учитывая, что щелочная фосфатаза у лососевых чувствительна к минеральному обмену (особенно обмену фосфора), возрасту и факторам среды, межгрупповые различия можно трактовать как адаптивные и биологически умеренные. Значительного влияния замены рыбьего жира растительными маслами на АЛП не выявлено, поскольку значения оставались в пределах нормы.

Активность аланинаминотрансферазы (АЛТ), которая катализирует перенос аминокислот от аланина на альфа-кетоглутаровую кислоту и является маркером функционального состояния печени у животных в том числе и у рыб, находилась в пределах 8–8,9 ед/л и не имела статистически значимых различий между группами. Полученные

значения соответствуют физиологическим нормам для радужной форели – 3–11,8 ед/л. (Rozas-Serri et al., 2022). Нарушения в липидном обмене, вызванные заменой жировых источников для рыб, приводят к жировой дегенерации печени, в следствии чего происходит повреждение мембран гепатоцитов, с выходом АЛТ в кровь, что является косвенным маркером сдвигов в морфофункциональном состоянии печени. Наше исследование подтверждает отсутствие выходящих за нормальные значения уровни АЛТ в крови у всех групп форели при их продолжительном выращивании на кормах с заменой рыбьего жира маслами растительного происхождения, что свидетельствует о сохранении морфофункциональной целостности печени.

Активность аспаратаминотрансферазы (АСТ) во всех экспериментальных группах зафиксирована в диапазоне 341,8–388,7 ед/л, что соответствует физиологическим значениям для радужной форели, выращиваемой в аквакультуре. Полученные результаты согласуются с данными (Karimi et al., 2014), где при полной и частичной замене рыбьего жира льняным маслом активность АСТ у радужной форели сохранялась на сопоставимом уровне (495–568 ед/л) и не имела статистически значимых отличий между группами. При этом известно, что уровень АСТ у лососевых остро реагирует на стресс и повреждения, а также на сезонные и гидрохимические факторы (Coşkun et al., 2016), что обусловлено его участием в транспорте аминокислот из миоцитов и гепатоцитов. Поэтому стабильно нормальные уровни в рамках опыта отражают адаптацию метаболизма и отсутствие значительного влияния на исследуемый параметр.

Таким образом, умеренные различия между группами отражают адаптивные реакции метаболизма, а не признаки метаболического стресса. Отсутствие достоверных изменений активности АЛТ, АСТ, щелочной фосфатазы, а также стабильный уровень креатинина и азота мочевины указывают на морфофункциональную сохранность печени, почек и отсут-

ствии цитолиза гепатоцитов. Проведенные исследования показали, что замена рыбьего жира растительными маслами в кормах радужной форели (в пределах исследованного диапазона) не приводит к нарушению метаболизма. Установленные статистически значимые межгрупповые различия в концентрации альбумина, общего белка, холестерина и триглицеридов не выходили за пределы физиологических референтных интервалов, что свидетельствует о сохранении нормального уровня белкового, липидного и углеводного обмена.

ОБСУЖДЕНИЕ

Современное рыбоводство сталкивается с необходимостью сокращения использования рыбьего жира в кормах вследствие ограниченности его сырьевой базы, высокой стоимости и экологических рисков. В качестве основного решения рассматривается замена рыбьего жира растительными маслами, обладающими высоким содержанием ПНЖК и экономической доступностью. Однако изменение жирнокислотного состава рациона может сопровождаться метаболической перестройкой, затрагивающей липидный, белковый, углеводный и азотистый обмен.

Проведенное исследование было направлено на оценку физиологического состояния радужной форели (*Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*) при длительном выращивании на комбикормах с частичной или полной заменой рыбьего жира на смеси растительных масел (льняного и рапсового), различающихся по содержанию суммы ЭПК и ДГК (0,3 и 1,2 г/100 г корма) и соотношению ЛК и АЛК.

В ходе 150-суточного эксперимента установлено, что вариации жирнокислотного состава корма в изученных диапазонах не оказывают угнетающего воздействия на ключевые гематологические и биохимические показатели, характеризующие иммунный статус и состояние метаболизма.

Концентрация гемоглобина у радужной форели за период исследования варьировала в широком диапазоне, имея заметную тен-

денцию к повышению содержания гемоглобина во всех группах рыб с течением эксперимента, возможно связанная с адаптивными способностями рыбы к условиям среды и увеличением массы тела.

Выявленная динамика содержания зрелых и незрелых эритроцитов согласуется с результатами анализа концентрации гемоглобина и цитометрических характеристик эритроцитов. Увеличение доли зрелых форм сопровождалось ростом объема эритроцитов и снижением ядерно-плазматического отношения, что указывает о накоплении гемоглобина в цитоплазме и повышении эффективности транспорта кислорода кровью. Совокупность выявленных изменений отражает закономерное возрастное формирование эритроцитарного звена крови и снижение доли молодых клеток по мере завершения интенсивной фазы роста, характерные для рыб в период развития функций кроветворения (Witeska, 2013; Javeed et al. 2022).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что вариации уровня ПНЖК в составе комбикормов не оказывают угнетающего влияния на процессы эритропоэза у радужной форели. Во всех экспериментальных группах сохранялось физиологически нормальное соотношение зрелых и незрелых эритроцитов, а выявленные различия соответствовали возрастной перестройке кроветворной системы, ранее описанной для *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* (Nabi et al., 2022; Witeska et al., 2023).

Анализ лейкоцитарного профиля не выявил признаков системного воспаления или иммунного дисбаланса. Стабильное преобладание лимфоцитов, отсутствие значимых сдвигов в содержании нейтрофилов и моноцитов, а также сопоставимые уровни тромбоцитов во всех экспериментальных группах указывают на сохранение функционального равновесия неспецифического звена иммунитета. Полученные данные свидетельствуют о том, что изменение в рационах соотношения омега-3/омега-6 жирных кислот в сторону увеличения растительных компонентов

в исследованных пределах не привело к активации противовоспалительных эйкозаноидов.

Наиболее чувствительными к изменению источника липидов оказались показатели липидного и белкового обмена. Установлены статистически значимые различия в уровнях холестерина и триглицеридов, значения которых были выше в контрольной группе, получавшей 100% рыбьего жира. В то же время, активность индикаторных ферментов (АЛТ, АСТ), а также концентрация креатинина и азота мочевины оставались в пределах физиологических референтных интервалов и не имели межгрупповых различий. Это подтверждает морфофункциональную сохранность печени и почек, а также отсутствие цитолиза гепатоцитов.

Таким образом, результаты проведенной работы свидетельствуют, что радужная форель обладает высокой адаптационной способностью к изменениям липидного состава рациона. Использование рационов с частичной заменой рыбьего жира на смеси льняного и рапсового масел (обеспечивающих содержание суммы ЭПК+ДГК на уровне не ниже 0,3 г/100 г корма), не зависимо от соотношения омега-6/омега-3 – является физиологически приемлемым и не вызывает патологических сдвигов в системе крови, или обмене веществ. Полученные результаты обосновывают возможность применения растительных масел в кормлении радужной форели как устойчивой альтернативы дефицитному рыбьему жиру, позволяющей поддерживать высокий физиологический статус рыб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барулин Н.В., Лиман М.С., Новикова Е.Г. и др.* Рекомендации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных промышленных комплексах (с временными нормативами). Горки: БГСХА, 2016. 180 с.
- Биндюков С.В., Бурлаченко И.В., Артемов Р.В. и др.* Особенности липидного обмена радужной форели при выращивании на комбикормах с различным соотношением полиненасыщенных жирных кислот // Тр. ВНИРО, 2025. Т. 200. С. 117–130. DOI: 10.36038/2307–3497–2025–200–117–130
- Биндюков С.В., Бурлаченко И.В., Баскакова Ю.А. и др.* Опыт замены рыбьего жира растительными маслами в комбикормах для радужной форели // Тр. ВНИРО. 2022. Т. 187. С. 138–148.
- Головина Н.А., Романова Н.Н.* Лабораторный практикум по физиологии животных. СПб.: Лань, 2019. 136 с.
- Иванова Н.Т.* Атлас клеток крови рыб. М.: Легк. и пищ. пром-сть, 1983. 184 с.
- Изергина Е.Е., Изергин И.Л., Изергин Л.И.* Атлас клеток крови лососевых рыб. Магадан: Кордис, 2014. 127 с.
- Конькова А.В., Богатов И.А., Файзулина Д.Р. и др.* Особенности физиологического состояния и окраски радужной форели *Oncorhynchus mykiss* (Salmonidae) при использовании кормовой добавки «Астапет 10%» в специализированных форелевых кормах // Вопр. рыболовства. 2023. Т. 24. № 4. С. 136–148.
- Методические указания по проведению гематологического обследования рыб // Сб. инструкций по борьбе с болезнями рыб. Ч. 2. М.: Отдел маркетинга АМБ-агро, 1999. С. 69–97.*
- Пахомов В.И., Хлыстунов В.Ф., Брагинцев С.В., Бахчевников О.Н.* Состояние и перспективы использования растительного сырья в кормах для аквакультуры (Обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23. № 3. С. 281–294.
- Пищенко Е.В.* Гематология пресноводной рыбы: учебное пособие. Новосибирск: Новосиб. гос. аграр. ун-т, 2002. 39 с.
- Сементина Е.В.* Ихтиогематологические показатели как критерий условий выращивания и обитания рыб: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Калининград: КГТУ, 2011. 23 с.
- Серпунин Г.Г.* Гематологические показатели адаптаций рыб: автореф. дис. д-ра биол. наук. Калининград: КГТУ, 2002. 49 с.
- Серпунин Г.Г.* Гематологические показатели адаптаций рыб: Монография. Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2010. 460 с.
- Силкин Ю.А., Силкина Е.Н., Черняева В.Н., Василец В.Е.* Морфометрия эритроцитов костистых рыб // Вопр. ихтиологии. 2019. Т. 59. № 1. С. 87–93.

- Щербина М.А., Гамыгин Е.А. Кормление рыб в пресноводной аквакультуре. М.: Изд-во ВНИРО, 2006. 360 с.
- Bardhan A., Abraham T.J., Singha J. et al. The effects of extended feeding of florfenicol coated medicated diets on the safety, serum biomarkers and blood cells morphology of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (L.) // *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. V. 29. № 26. P. 39914–39927. DOI:10.21203/rs.3.rs-707214/v1
- Caballero-Solares A., Eslamloo K., Hall J.R. et al. Vegetable omega-3 and omega-6 fatty acids differentially modulate the antiviral and antibacterial immune responses of Atlantic salmon // *Scientific Reports*, 2024. V. 14. № 1. P. 7–10. DOI:10.1038/s41598-024-61144-w
- Coskun O.F., Aydin D., Duman F. Comparison of some blood parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) living in running and still water // *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 2016. V. 15. № 1. P. 497–507.
- Davidson J., Good C., Welsh C., Summerfelt S.T. Comparing the effects of high vs. low nitrate on the health, performance, and welfare of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) within water recirculating aquaculture systems // *Aquacultural Engineering*, 2014. V. 59. P. 30–40. DOI:10.1016/j.aquaeng.2014.01.003
- European Market Observatory for Fisheries and Aquaculture Products (EUMOFA). Fishmeal and fish oil: Production and trade flows in the EU. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2025.
- Fazio F., Saoca C., Capillo G. et al. Intra-variability of some biochemical parameters and serum electrolytes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792)) bred using a flow-through system // *Heliyon*, 2021. V. 7. № 2. P. 1–3. DOI:10.1016/j.heliyon.2021.e06361
- Ferdous F., Scott T. The immunological capacity of thrombocytes // *International J. of Molecular Sciences*, 2023. V. 24. № 16. DOI:10.3390/ijms241612950
- Javeed H., Bhat A.F., Shahet H.T. et al. Fish haematology: A review // *The Pharma Innovation Journal*. 2022. V. 11. № 5. P. 230–232.
- Johari S.A. Kalbassi M. R., Sourinezhad I., et al. Observation of red blood cell alterations in triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // *Acta Sci Pol Piscaria*. 2008. V. 7. P. 49–52.
- Karimi M.R., Ebrahimi E., Soofiani N.M. et al. Replacement of Dietary Fish Oil with Flaxseed Oil and its Effects on Hematological and Biochemical Parameters of Rainbow Trout Fingerlings (*Oncorhynchus mykiss*) // *World J. Fish and Marine Sciences*. 2014. V. 6. №. 3. P. 209–213.
- Katan T., Caballero-Solares A., Taylor R.G. et al. Effect of plant-based diets with varying ratios of $\omega 6$ to $\omega 3$ fatty acids on growth performance, tissue composition, fatty acid biosynthesis and lipid-related gene expression in Atlantic salmon (*Salmo salar*) // *Comp. Biochem. Physiol. Part D Genom. Proteom.* 2019. V. 30. P. 290–304. DOI:10.3390/biology10070578
- Keitel-Gröner F., Hoel E., Husebø C. et al. Haematological and Biochemical Reference Intervals Towards a Proactive Health Monitoring Approach in Norwegian Atlantic Salmon Farming // *J. Fish Diseases*, 2025. V. 48. № 9. P. 10. DOI:10.1111/jfd.14036
- Kostyniuk D.J., Scott G.R., Currie S. The influence of social status on the metabolic responses of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) to stress // *Frontiers in Physiology*. 2018. V. 9. P. 308–320. DOI:10.1086/666497
- Lazzarotto V., Corraze G., Larroquet L. et al. Long-term dietary replacement of fishmeal and fish oil by plant-based ingredients in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // *PLOS ONE*, 2018. V. 13. № 1. P. 15–19. DOI:10.1371/journal.pone.0190730
- Liu Z.L., Zhao W., Hu W.S. et al. Lipid metabolism, growth performance, antioxidant ability and intestinal morphology of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) under cage culture with flowing water were affected by dietary lipid levels // *Aquaculture Reports*. 2021. V. 19. P. 6–7. DOI:10.1016/j.aqrep.2021.100593
- Lone G.N., Shammi Q.J., Mir S.A. et al. Rainbow trout hematology coinciding with metabolic requirement // *Walailak J. Science and Technology*. 2012. V. 9. № 4. P. 309–316. DOI:10.2004/wjst.v9i4.282
- Meng Y.W., Liu J.Y. Pathological and pharmacological functions of the metabolites of polyunsaturated fatty acids mediated by cyclooxygenases, lipoxigenases, and cytochrome P450s

- in cancers // *Pharmacology & Therapeutics*. 2024. V. 256. 15 p. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2024.108612
- Nabi N., Ahmed I., Wani G.B. Hematological and serum biochemical reference intervals of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* cultured in Himalayan aquaculture: Morphology, morphometrics and quantification of peripheral blood cells // *Saudi J. Biological Sciences*. 2022. V. 29. № 4. P. 2942–2957. DOI: 10.1016/j.sjbs.2022.01.019
- Okomoda V.T., Koh ICC, Hassan A et al. Cell Axis Ratio a Standardized Approach for Normal Erythrocyte Shape Determination in Fishes // *J. Fisheries and Aquatic Science*, 2017. V. 12. № 6. P. 284–288. DOI:10.3923/jfas.2017.284.288
- Rahkonen R., Vennerström P., Rintamäki P. et al. Здоровая рыба: Профилактика, диагностика и лечение болезней, 2013. С. 16–21.
- Řehulka J., Minařík B. Cholesterolaemia and triacylglycerolaemia in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // *Aquaculture Research*. 2012. V. 43. № 7. P. 1054–1063. DOI:10.1111/j.1365-2109.2011.02971.x
- Richard N., Kaushik S., Larroquet L. et al. Replacing dietary fish oil by vegetable oils has little effect on lipogenesis, lipid transport and tissue lipid uptake in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // *British J. Nutrition*. 2006. V. 96. № 2. P. 299–309. DOI:10.1079/BJN20061821
- Rozas-Serri M., Correa R., Walker-Vergara R. et al. Reference Intervals for Blood Biomarkers in Farmed Atlantic Salmon, Coho Salmon and Rainbow Trout in Chile: Promoting a Preventive Approach in Aquamedicine // *Biology*. 2022. V. 11. 37 p. DOI:10.3390/biology11071066
- Soldatov A.A., Kukhareva T.A., Morozova V.N. Morphometric parameters of erythroid hemocytes of alien bivalve mollusks: cytometric analysis of cells // *Ruthenica*, 2021. V. 31. № 1. P. 77–86.
- Witeska M. Erythrocytes in teleost fishes: A review // *Zoology and Ecology*. 2013. V. 23. № 4. P. 2-4. DOI:10.1080/21658005.2013.846963
- Witeska M., Kondera E., Bojarski B. Hematological and hematopoietic analysis in fish toxicology – A review // *Animals*. 2023. V. 13. № 16. 12 p. DOI:10.3390/ani13162625
- Witeska M., Kondera E., Ługowska K., Bojarski B. Hematological methods in fish – Not only for beginners // *Aquaculture*. 2022. V. 547. 17 p. DOI:10.1016/j.aquaculture.2021.737498

AQUACULTURE AND ARTIFICIAL REPRODUCTION

EFFECT OF PLANT POLYUNSATURATED FATTY ACIDS ON THE PHYSIOLOGICAL STATE, HEMATOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS OF RAINBOW TROUT *ONCORHYNCHUS (PARASALMO) MYKISS*

© 2026 y. S.V. Bindyukov, N.Y. Terpugova, M.V. Arnautov, I.V. Burlachenko

*State Scientific Center of the Russian Federation «VNIRO»,
Russia, Moscow, 105187*

The aim of this study was to characterize the blood parameters of rainbow trout to assess the impact of varying dietary polyunsaturated fatty acid ratios on the physiological status of fish. Based on an analysis of a complex of hematological and biochemical parameters in rainbow trout blood, the adaptive capabilities of fish to maintain a high metabolic rate and immune status were established when fed diets with varying ratios of vegetable oils and fish oil, including those deficient in essential long-chain polyunsaturated fatty acids. Quantitative characteristics of the level of vegetable oil addition to the feed were determined, ensuring the preservation and maintenance of the normal physiological status of trout.

Key words: rainbow trout, physiological state, hematological parameters, biochemical parameters, fish oil, vegetable oils, fatty acid composition, hemoglobin, ALT, AST.