

ВЛИЯНИЕ МИКРОБНОГО БЕЛКА НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ И ТКАНЕВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ У НИЛЬСКОЙ ТИЛЯПИИ (*Oreochromis niloticus*)

^{1,2}С.В. Пономарев, ¹Ю.В. Федоровых, ¹А.Б. Ахмеджанова, ¹О.А. Левина, ³П.А. Нюньков, ¹Н.В. Терганова

¹Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

²Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина, Москва, Россия

³ООО «Гипробiosинтез», Москва, Россия

E-mail: lab.sturgeon@yandex.ru

Для цитирования: Влияние микробного белка на физиологическое состояние и тканевое распределение макро- и микроэлементов у нильской тилляпии (*Oreochromis niloticus*) / С.В. Пономарев, Ю.В. Федоровых, А.Б. Ахмеджанова, О.А. Левина, П.А. Нюньков, Н.В. Терганова // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2025. – № 4 (77). – С. 236–246. – DOI: 10.31677/2072-6724-2025-77-4-236-246.

Ключевые слова: белок, добавка, аквакультура, тилляпия, микроэлементы, физиология, кормление.

Реферат. В контексте динамичного развития аквакультуры оптимизация рационов и поддержание здоровья рыб приобретают первостепенное значение. Настоящая работа посвящена исследованию воздействия белково-минеральной кормовой добавки ДРИМФИД® на физиологический статус сеголеток нильской тилляпии (*Oreochromis niloticus*) и динамику аккумуляции и резорбции ключевых микроэлементов в их тканях и органах. Экспериментальный комбикорм с ДРИМФИД® отличался повышенным содержанием белка (64,3 %) и сниженным уровнем жира (8,9 %) в сравнении с контрольным образцом. Микроэлементный анализ выявил существенное увеличение концентрации меди (299 мг/кг) и калия (7290 мг/кг) в опытной группе, в то время как в контрольном корме значения составили 11,3 и 4480 мг/кг соответственно. У рыб, получавших ДРИМФИД®, наблюдались стабильные показатели глюкозы в крови, находящиеся в пределах 4–5,7 ммоль/л, что соответствует оптимальному диапазону (5,0–6,0 ммоль/л). Анализ лейкограммы выявил увеличение палочкоядерных нейтрофилов (12,9 %) и моноцитов (8 %) у контрольных особей, что может свидетельствовать о развитии воспалительных процессов. В группе, получавшей ДРИМФИД®, данные показатели находились в пределах нормы. Изучение динамики макро- и микроэлементов в тканях и органах продемонстрировало общие тенденции, однако были зафиксированы и специфические различия, обусловленные разным составом рационов. Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность использования кормовой добавки ДРИМФИД® для улучшения физиологического состояния нильской тилляпии и повышения ее продуктивных характеристик.

THE EFFECT OF MICROBIAL PROTEIN ON THE PHYSIOLOGICAL STATE AND TISSUE DISTRIBUTION OF MACRO- AND MICROELEMENTS IN NILE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*)

^{1,2}S.V. Ponomarev, ¹Yu.V. Fedorovykh, ¹A.B. Akhmedzhanova, ¹O.A. Levina, ³P.A. Nunkov, ¹N.V. Terganova

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

²Moscow State Academy of Veterinary Medicine and Biotechnology – MBA named after K.I. Skryabin, Moscow, Russia

³Giprobiosynthesis LLC, Moscow, Russia

E-mail: lab.sturgeon@yandex.ru

Keywords: protein, supplement, aquaculture, tilapia, trace elements, physiology, feeding.

Abstract. In the context of the dynamic development of aquaculture, optimizing diets and maintaining fish health are of paramount importance. This work is devoted to the study of the effect of the protein-mineral feed additive DREAMFID® on the physiological status of fingerlings of the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and the dynamics of accumulation and resorption of key trace elements in their tissues and organs. The experimental mixed feed with DREAMFID® was characterized by an increased protein content (64.3 %) and a reduced fat level (8.9 %) compared with the control sample. Trace element analysis revealed a significant increase in the concentrations of copper (299 mg/kg) and potassium (7290 mg/kg) in the experimental group, while in the control feed the values were 11.3 mg/kg and 4480 mg/kg, respectively. In fish treated with DREAMFID®, stable blood glucose levels were

observed, ranging from 4–5.7 mmol/l, which corresponds to the optimal range (5.0–6.0 mmol/l). Analysis of the leukogram revealed an increase in rod-shaped neutrophils (12.9 %) and monocytes (8 %) in control individuals, which may indicate the development of inflammatory processes. In the group receiving DREAMFID®, these indicators were within the normal range. The study of the dynamics of macro- and microelements in tissues and organs demonstrated general trends, however, specific differences due to different composition of diets were also recorded. The results of the study confirm the effectiveness of using the feed additive DREAMFID® to improve the physiological state of the Nile tilapia and increase its productive characteristics.

Современная аквакультура стремится к интенсификации производства, что обуславливает повышенное внимание к использованию биологически активных веществ (БАВ) в рационах гидробионтов для оптимизации роста, поддержания иммунитета и повышения резистентности к заболеваниям [1–3]. Отечественные научные школы активно разрабатывают инновационные кормовые решения, адаптированные к условиям российского рынка, с акцентом на использование БАВ, что подтверждается рядом актуальных исследований [4–6].

В условиях растущих потребностей аквакультуры в высококачественных и экологически устойчивых источниках белка перспективным направлением является применение микробного белка, получаемого на основе природного газа. Данный подход позволяет не только повысить питательную ценность кормов, но и снизить зависимость от традиционных источников, таких как рыбная мука, актуальность которой возрастает на фоне ограниченности природных ресурсов. В России исторически существовал значительный научно-технологический потенциал и производственные мощности для получения микробного белка из углеводородного сырья, несмотря на последующую ликвидацию предприятий [7–9].

Современные разработки, ведущиеся специалистами ООО «Гипробiosинтез», направлены на восстановление и совершенствование данной технологии, базирующейся на штамме *Methylococcus capsulatus* ГБС-15. Данный штамм, депонированный во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов, обладает уникальными технологическими характеристиками, обеспечивающими его эффективное применение в промышленных масштабах.

Штамм *Methylococcus capsulatus* ГБС-15 демонстрирует ряд значительных преимуществ: повышенную устойчивость к продуктам соокисления гомологов метана, позволяющую использовать природный газ с вариативным составом; способность к автотрофной фиксации углекислого газа, снижающую коэффициент потребления субстрата; фагоустойчивость; устойчивость к кратковременным колебаниям температуры и давления; конкурентоспособность по отношению к другим метанооксиляющим бактериям и термо-

толерантность. Важно отметить, что штамм не является патогенным, не содержит генетически модифицированных элементов и не включает гены других организмов.

Настоящее исследование посвящено оценке эффективности кормовой добавки ДРИМФИД®, представляющей собой концентрат микробного белка, полученного на основе штамма ГБС-15, в качестве белково-минерального компонента рационов нильской тилляпии. Основное внимание уделяется влиянию данной добавки на физиологическое состояние рыб, а также на процессы накопления и резорбции важных микроэлементов в их организме.

Цель исследования – оценить эффективность включения кормовой добавки ДРИМФИД® в рацион нильской тилляпии в качестве белково-минерального компонента. Исследование направлено на выявление влияния данной добавки на физиологический статус рыб, а также на детальное изучение процессов аккумуляции и элиминации меди, калия и других эссенциальных микроэлементов в различных органах и тканях.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- 1) разработка экспериментальной партии комбикорма с существенным замещением рыбной муки (94 %) кормовой добавкой ДРИМФИД® и проведение апробации данного рациона на сеоглетках нильской тилляпии;
- 2) оценка физиологических показателей при использовании разработанных экспериментальных рационов;
- 3) изучение динамики накопления меди в организме тилляпии в течение всего периода выращивания.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В целях оценки эффективности разработанных рецептур комбикормов для аквакультуры были проведены экспериментальные исследования на нильской тилляпии (*Oreochromis niloticus*) как модельном объекте. Эксперименты осуществлялись в контролируемых условиях аквариального комплекса и лаборатории НИЛ «Осетроводство и перспективные объекты аквакультуры» ФГБОУ ВО Астраханский государственный технический

университет. Детальное описание используемых материалов, методов содержания, кормления и последующего анализа представлено ниже.

В качестве объекта исследования использовали сеголеток нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*). Эксперименты проводились в стеклянных аквариумах объемом 400 л, оснащенных системами принудительной аэрации, фильтрации и терморегуляции. Плотность посадки сеголеток составляла 100 особей на аквариум, при этом для каждой группы (опытной и контрольной) было предусмотрено по две повторности. Опытный комбикорм был изготовлен в лабораторных условиях с использованием методов прессования, сушки и фракционирования. Содержание кормовой добавки ДРИМФИД® в опытном комбикорме составляло 94 %, рецептура также включала 1 % премикса и 5 % рыбьего жира. В качестве контрольного корма использовался коммерческий комбикорм производства ООО «БИФФ» (Астраханская область), состав которого включал: рыбную муку (35 %), мясную муку (20 %), кровяную муку (5 %), пшеничную муку (22 %), кукурузный глютен (10 %), рыбий жир (7 %) и премикс (1 %).

Кормление осуществлялось в соответствии с суточными нормами и кормовыми таблицами, основанными на массе рыбы и температуре воды (25–26 °C) [10].

Для сравнительной оценки эффективности кормов проводился анализ физиолого-биохимических показателей крови. Забор крови для анализа осуществлялся прижизненно из хвостовой вены с использованием пробирок Эппендорфа в начале и по завершении эксперимента.

Определение лейкоцитарной формулы крови проводилось на окрашенных гематологических препаратах с использованием иммерсионной микроскопии (увеличение 100/1,25) согласно общепринятым методикам [11–13].

Для биохимического анализа образцы крови отбирали в пробирки без гепарина, позволяя крови коагулировать для получения сыворотки. Содержание холестерина, предшественника гормонов, играющего важную роль в иммунной системе и участвующего в метаболических процессах, определяли энзиматическим методом с использованием набора реактивов фирмы «Ольвекс диагностикум» [14, 15].

Определение общих липидов в сыворотке крови проводилось с использованием набора реактивов фирмы PLIVA – Lachema [16]. Уровень бета-липопротеидов определяли по методу Бурштейна [17].

Содержание микроэлементов (Cu, Zn, Mn, K, Co, Mg, Fe, Cr) в печени, мышечной и костной тканях, а также в тканях головы определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрометре «Квант-2А».

Длительность экспериментального периода выращивания составила 120 сут.

Полученные данные подвергались статистической обработке с использованием методов вариационной статистики в программном пакете Excel [18]. При этом рассчитывались среднее значение, ошибка среднего. Достоверность различий между группами оценивалась с использованием *t*-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Состояние организма рыб в исследуемых условиях культивирования оценивали на основании анализа физиолого-биохимических показателей крови, как чувствительных индикаторов общего состояния и метаболических процессов.

В динамике показателей белкового обмена в обеих экспериментальных группах наблюдалась сходная картина: на втором месяце выращивания отмечался пик концентрации альбумина (35,4 г/л в опытной группе и 30,9 г/л в контрольной), что соответствовало превышению относительно исходных значений на 15,25 %. В дальнейшем происходило снижение уровня альбумина до 30,0 и 25 г/л (16,67 %), однако зарегистрированные значения оставались выше первоначальных (28,0 и 22,7 г/л).

Переходя к оценке липидного обмена, следует отметить, что динамика концентрации холестерина не выявила выраженных различий между исследуемыми группами. В опытной группе отмечались незначительные колебания уровня холестерина (снижение с 3,1 до 3,0 ммоль/л с последующим повышением до 3,8 ммоль/л на третьем месяце эксперимента). Аналогичные изменения наблюдались и в контрольной группе (снижение концентрации холестерина с 3,8 до 3,5 ммоль/л). Важно отметить, что во всех случаях зарегистрированные значения находились в пределах физиологических границ для рыб.

В отличие от холестерина концентрация β-липопротеидов демонстрировала иную динамику. В контрольной группе на начальном этапе выращивания уровень β-липопротеидов был существенно ниже (0,85 г/л), однако в ходе эксперимента произошло его увеличение до 2,3 г/л. В опытной группе уровень β-липопротеидов варьировал в пределах 2,2–3,1 г/л.

Наряду с показателями белкового и липидного обмена важную информацию о состоянии

организма предоставляет анализ лейкоцитарной формулы крови, являющейся ценным индикатором общего физиологического состояния и активности клеточного иммунитета. Статистически значимые различия между группами были обнаружены при анализе содержания палочкоядерных нейтрофилов. В контрольной группе этот показатель достиг максимального значения к концу эксперимента ($12,9 \pm 0,18$ %), превысив исходный уровень (9,8 %). В опытной группе,

напротив, наблюдалось снижение количества нейтрофилов на 1,1 % в течение периода выращивания. Кроме того, лейкограмма рыб контрольной группы демонстрировала значительное увеличение количества моноцитов: с 2,2 до 8 %.

В рамках исследования был проведен анализ содержания макро- и микроэлементов в органах и тканях рыб исследуемых групп. Результаты анализа содержания меди представлены на рис. 1.

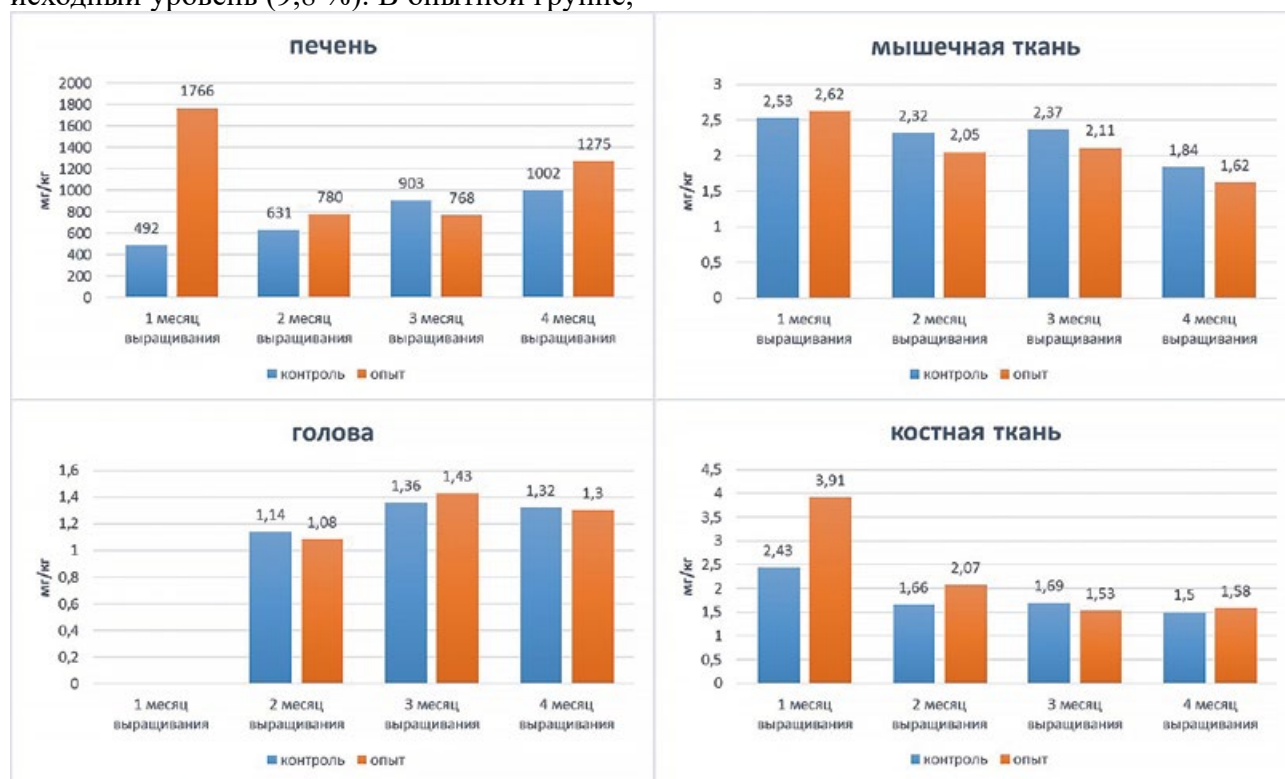


Рис. 1. Динамика изменения содержания меди в тканях и органах рыб
Dynamics of changes in copper content in fish tissues and organs

Исходный уровень меди в печени опытной группы превышал аналогичный показатель в контрольной группе на 1274 мг/кг. В дальнейшем в ходе эксперимента содержание меди в обеих группах варьировало в пределах 631–780 мг/кг. К концу эксперимента уровень меди в опытной группе составил 1275 мг/кг, что на 272 мг/кг выше, чем в контрольной группе (превышение на 21,41 %). Содержание меди в мышечной ткани в обеих группах к концу эксперимента снизилось: в опыте с 2,62 до 1,62 мг/кг, в контроле – с 2,53 до 1,84 мг/кг. В тканях головы у обеих групп произошло незначительное увеличение содержания меди: в опыте на 0,22 мг/кг, в контроле на 0,18 мг/кг. Анализ содержания меди в костной ткани рыб выявил снижение ее концентрации в обеих группах за период выращивания. При этом снижение было более выраженным у опытных экземпляров, получавших корм с ДРИМФИД®

(с 3,91 до 1,58 мг/кг, что соответствует 59,59 %), чем в контрольной группе (с 2,43 до 1,5 мг/кг, или 38,27 %). Данная динамика, вероятно, отражает перераспределение меди между различными тканями и органами в процессе роста и развития рыб.

Вместе с тем анализ содержания цинка продемонстрировал иную картину. Согласно полученным экспериментальным данным, накопление цинка происходило преимущественно в печени обеих групп рыб, что может указывать на важную роль печени в депонировании и регуляции метаболизма цинка независимо от рациона питания. В опытной группе, получавшей ДРИМФИД®, содержание цинка увеличилось с 66,7 до 92,5 мг/кг (на 39 %) в период со второго месяца выращивания до конца эксперимента. В контрольной группе прирост был менее выраженным и составил 7,76 % (с 77,3 до 83,3 мг/кг). В остальных исследованных тканях и органах наблюдалась противоположная тенденция: сни-

жение концентрации цинка. Особенно заметным это было в мышечной ткани, где концентрация цинка составила 9,7 мг/кг в опытной группе и 25,1 мг/кг в контрольной.

Переходя к анализу распределения марганца, следует отметить, что динамика его содержания в мышечной ткани и печени была сходной для обеих групп: незначительное увеличение в печени и снижение в мышечной ткани. Однако в костной ткани и тканях головы наблюдались существенные различия между группами, особенно в контроле. Разница в содержании марганца на третьем месяце выращивания составила 8,67 мг/кг в костной ткани (с преобладанием в контрольной группе на 76,7 %) и 4,32 мг/кг в тканях головы (с преобладанием в контроле на 75,56 %).

В отличие от цинка и марганца значения калия в исследуемых тканях оставались относительно стабильными после первого месяца выращивания, достигая максимальных показателей в мышечной ткани (21,89 г/кг – опытная группа, 1-й месяц выращивания) и печени (15,0 г/кг – опытная группа, 1-й месяц выращивания), что может указывать на эффективную регуляцию гомеостаза калия в данных условиях.

Анализ содержания микроэлементов в тканях рыб выявил, что кобальт регистрировался в следовых значениях или не был обнаружен совсем, что может быть связано с его низким содержанием в используемых кормах.

В отличие от кобальта, магний обнаруживался в значительных количествах в тканях рыб обеих групп. Максимальные значения магния были отмечены в костной и мышечной тканях (1789 мг/кг в контроле и 1718 мг/кг в опыте), при этом достоверных различий в содержании этого элемента между контрольной и опытной группой не зарегистрировано. Минимальное количество магния было обнаружено в печени (483 и 476 мг/кг в опыте и контроле на 4-й месяц выращивания соответственно), что может указывать на особенности метаболизма магния в этом органе.

Переходя к анализу содержания железа, необходимо отметить, что в мышечной, костной ткани и тканях головы достоверных отличий между группами также не выявлено. Изменения в его содержании происходили сходным образом в обеих группах. Однако в печени количество железа в контрольной группе было значительно выше на протяжении всего периода выращивания. Если на начальном этапе в печени контрольной группы было обнаружено 262 мг/кг железа, а в опытной на 54 мг/кг выше, то в дальнейшем разница между группами стала еще более заметной: в опыте содержание элемента к концу выращивания увеличилось лишь на 3 мг/кг, в то время как в контроле произошло увеличение на 630 мг/кг.

В завершение анализа микроэлементного состава тканей рыб рассмотрим динамику содержания хрома, представленную на рис. 2.

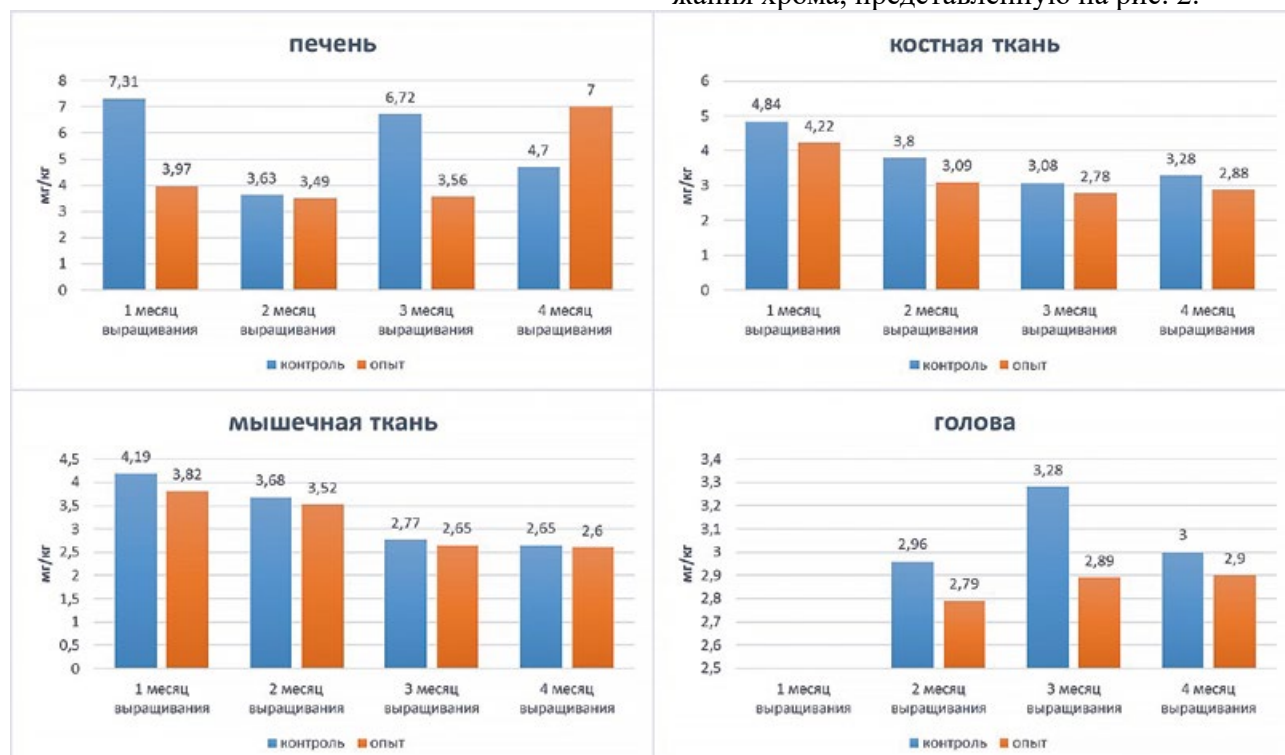


Рис. 2. Динамика изменения содержания хрома в тканях и органах рыб
Dynamics of changes in chromium content in fish tissues and organs

В костной и мышечной ткани наблюдалось одновременное снижение количества хрома по мере роста рыб обеих групп. Различия в содержании этого микроэлемента проявлялись в печени и тканях головы. Так, в контрольной группе было зарегистрировано максимальное содержание хрома на первом месяце выращивания (7,31 мг/кг) с последующим снижением на втором месяце до 3,63 мг/кг (50,3 %). Однако на третьем месяце наблюденный количество хрома вновь увеличилось до 6,72 мг/кг, а далее снизилось до 4,7 мг/кг (30,6 %). В опытной группе наблюдалось постепенное накопление хрома в тканях печени (от 3,97 до 4,7 мг/кг), а в тканях головы отмечалось такое же неравномерное содержание хрома в течение периода исследований у контрольных экземпляров и постепенное увеличение в опытной группе (с 2,79 до 2,9 мг/кг, что соответствует увеличению на 3,6 %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рамках настоящего исследования было оценено влияние кормовой белковой добавки ДРИМФИД® на физиологическое состояние организма. Учитывая, что в процессе производства ДРИМФИД® используется минеральная среда, обогащенная солями различных микроэлементов (включая медь, концентрация которой может варьироваться в пределах 200–300 мг/кг), и принимая во внимание более низкую концентрацию меди в традиционных кормах, а также ее способность к кумуляции в тканях [19], возникла необходимость в комплексной оценке воздействия данной добавки на организм. Состав и питательная ценность разработанных комбикормов представлены в таблице, а содержание микроэлементов – на рис. 3. Важно отметить, что опытный комбикорм, содержащий ДРИМФИД®, отличался повышенным содержанием белка (64,3 %), меди (299 мг/кг) и калия (7290 мг/кг), а также пониженным содержанием жира (8,9 %) по сравнению с контрольным рационом.

Состав опытного и контрольного комбикормов
Composition of experimental and control compound feeds

Комбикорм	Влага, %	Зола, %	Сырой протеин, % (по Кьельдалю)	Белок, % (Барнштейн)	Сырой жир (липиды), %
Контроль (марки ООО «БИФФ»)	4,63	9,82	44,7	39,10	13,1
Опыт (с добавкой ДРИМФИД®)	4,41	5,84	68,9	64,3	8,9

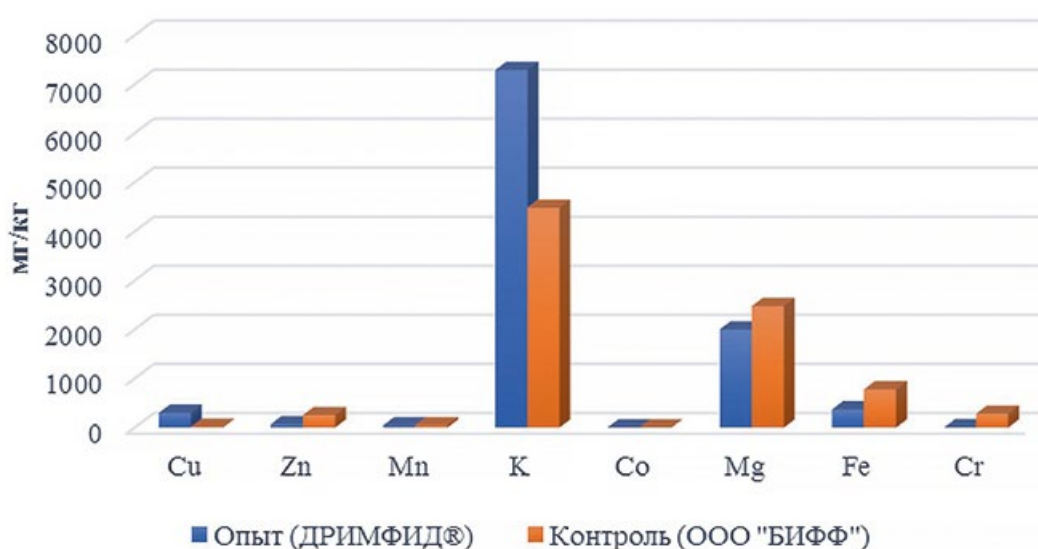


Рис. 3. Содержание микроэлементов в комбикормах
Microelement content in compound feed

Для оценки влияния ДРИМФИД® на метаболические процессы был проведен анализ динамики альбумина, доминирующего белка плазмы крови рыб, выполняющего ряд критически важных функций, включая поддержание онкотического давления, транспорт веществ, детоксикацию организма и являющегося источником эндогенных аминокислот. Предполагается, что наблюдаемая динамика изменения концентрации альбумина может быть связана с постепенным снижением температуры воды, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

Параллельно с оценкой белкового обмена проводился анализ показателей липидного обмена, в частности, концентрации холестерина и β -липопротеидов, являющихся основными транспортными формами холестерина. Дисрегуляция липидного обмена, проявляющаяся в изменении концентрации данных показателей, может свидетельствовать о хроническом стрессовом воздействии или развитии жировой перегрузки организма, что также было принято во внимание.

В дополнение к анализу белкового и липидного обмена концентрация глюкозы в сыворотке крови рассматривалась как индикатор стрессовых реакций. Известно, что гипергликемия, индуцированная рыбоводными процессами, колебаниями температуры или транспортировкой, является распространённым признаком стресса. С другой стороны, снижение концентрации глюкозы может свидетельствовать об оптимизации метаболических процессов.

Важным компонентом оценки физиологического состояния рыб являлся анализ лейкоцитарной формулы крови, служащей ценным индикатором не только общего состояния организма, но и активности клеточного иммунитета. Изменения в лейкограмме, сигнализирующие о нарушениях метаболических процессов и ухудшении состояния организма, могут возникать задолго до манифестации клинических признаков патологий. Характерный для рыб лимфоцитарный профиль, где доминирующую роль играют лимфоциты (70–90 % от общего количества лейкоцитов), был принят во внимание при анализе данных. Появление более молодых клеток нейтрофильного ряда в периферической крови, что обычно ассоциируется с патологическими состояниями и стимуляцией гемопоэза, а также увеличение количества моноцитов, наблюдаемое в контрольной группе, могут свидетельствовать о развитии воспалительных процессов в организме. Данные изменения в лейкоцитарной формуле указывают

на необходимость дальнейшего изучения возможных причин активации иммунной системы у рыб контрольной группы.

В контексте оценки общего физиологического состояния, наряду с анализом гематологических показателей, в рамках исследования был проведен анализ содержания макро- и микроэлементов в органах и тканях рыб исследуемых групп. Полученные результаты демонстрируют общую тенденцию по увеличению или уменьшению содержания меди как в опытной, так и в контрольной группах, что требует более детального рассмотрения механизмов регуляции метаболизма меди в организме рыб при использовании кормовой добавки ДРИМФИД®. Содержание меди в мышцах рыб соответствует допустимым значениям для пищевых продуктов – ниже 10 мг/кг, что согласуется с данными И.Н. Остроумовой [19]. Поскольку печень является основным депо для меди, высокое содержание было характерно для обеих экспериментальных групп. Важно отметить, что несмотря на это данные о приросте и физиологическом состоянии рыб не демонстрировали негативного эффекта. Выживаемость рыб была 100%-й, показатели роста и крови стабильными, что позволяет говорить об отсутствии токсического эффекта даже при повышенном содержании меди в рационе.

Тот факт, что содержание цинка в мышечной ткани снижается и при этом находится в пределах допустимых концентраций для пищевых продуктов (до 40 мг/кг) [19], можно рассматривать как положительную тенденцию, учитывая важную роль цинка во многих метаболических процессах. В частности, цинк участвует в метаболизме простагландинов, нуклеиновых кислот, белков, жиров и углеводов, а также оказывает влияние на рост, развитие, размножение, образование костей, кроветворение и зрение рыб.

В свою очередь, марганец, также являясь эссенциальным микроэлементом, входит в состав многих ферментных систем и активизирует обмен белков, жиров и углеводов, а также влияет на фосфорно-кальциевый обмен. От присутствия марганца зависит рост, образование костей, кроветворение и размножение рыб [20]. При этом основным депо марганца является скелет, где он присутствует в виде неорганических соединений. Интересно, что при практически одинаковом изначальном содержании марганца в комбикорме ООО «БИФФ» (44,4 мг/кг Mn) и в корме с белковой добавкой ДРИМФИД® (42,5 мг/кг Mn) наблюдаемые различия в динамике содержания

марганца в костной и головной ткани представляются требующими дальнейшего изучения для выявления лежащих в основе этих различий механизмов.

В отличие от микроэлементов цинка и марганца калий относится к макроэлементам и содержится в большом количестве в компонентах как животного, так и растительного и микробного происхождения (от нескольких граммов до 10–20 г/кг компонента). Характеризуясь высокой усвояемостью из различных животных и растительных продуктов (приближающейся к 100 %), калий активно расходуется в тканях и органах, участвуя в водно-солевом обмене. Его усвоение оказалось значительно выше, чем всех других исследованных макро- и микроэлементов, что подчеркивает важную роль калия в поддержании гомеостаза.

Низкие или следовые значения кобальта, зарегистрированные в тканях рыб, согласуются с литературными данными о его незначительном содержании в большинстве кормов и тканях животных, что подтверждает гипотезу о низком поступлении этого элемента в организм исследуемых рыб.

Переходя к анализу содержания магния, необходимо отметить отсутствие достоверных различий между контрольной и опытной группами, несмотря на различия в составе используемых кормов. Этот факт позволяет предположить наличие эффективных механизмов регуляции гомеостаза магния в организме рыб, обеспечивающих поддержание его концентрации в тканях на относительно постоянном уровне, независимо от колебаний в поступлении с кормом.

Однако, несмотря на наличие гомеостатических механизмов, железо, являясь компонентом гемсодержащих ферментов и активно участвуя в окислительно-восстановительных процессах, демонстрировало значительные различия в накоплении в печени в зависимости от группы. Вероятно, более высокое содержание железа в печени контрольной группы связано с более высоким содержанием этого элемента в комбикорме ООО «БИФФ» (776 мг/кг) по сравнению с кормом с белковой добавкой ДРИМФИД® (366 мг/кг), что указывает на важную роль пищевого фактора в регуляции накопления железа в этом органе.

Наконец динамика изменения количества хрома в тканях рыб отражает сложное взаимодействие между поступлением этого элемента с кормом и процессами его метаболизма в организме. Различия в содержании хрома в опытном и

контрольном комбикормах (3,1 и 282 мг/кг соответственно), по-видимому, объясняют различия в накоплении хрома в печени и тканях головы между группами. При этом наблюдаемое неравномерное содержание хрома в тканях головы у контрольных экземпляров требует дальнейших исследований для выяснения механизмов регуляции гомеостаза хрома и оценки его влияния на физиологические процессы в организме рыб.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования была осуществлена замена 94 % рыбной муки на белковую кормовую добавку ДРИМФИД®, представляющую собой концентрат микробного белка *Methylococcus capsulatus* с добавлением незаменимых серосодержащих аминокислот (метионин – 1,8 %, цистеин/цистин – 0,4 %) и минеральных компонентов (калий, магний, фосфор и др.), в рецептуре производственного комбикорма для сеголеток тилапии. Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

1. Опытный комбикорм, содержащий ДРИМФИД®, отличался от контрольного (производства ООО «БИФФ») более высоким содержанием белка (64,3 против 35%) и более низким содержанием жира (8,9 против 1 %). Микроэлементный состав также различался: в опытном корме было повышено содержание меди (299 мг/кг) и калия (7290 мг/кг), в то время как контрольный корм характеризовался более высоким содержанием цинка, марганца, железа и хрома.

2. Анализ физиолого-биохимических показателей крови выявил положительное влияние кормления кормом с ДРИМФИД® на состояние здоровья рыб. В частности, отмечалось следующее:

– в обеих экспериментальных группах был зарегистрирован пик содержания альбумина на втором месяце выращивания (35,4 г/л в опытной группе и 30,9 г/л в контрольной), что соответствовало превышению на 15,25 % по сравнению с контрольными значениями;

– в опытной группе стабильная концентрация глюкозы в пределах физиологических норм (4–5,7 ммоль/л);

– концентрация холестерина незначительно снижалась в обеих группах в течение эксперимента, оставаясь в пределах физиологических норм;

– концентрация β-липопротеидов в крови рыб опытной группы находилась в диапазоне 2,2–3,1 г/л. В контрольной группе наблюдалось

увеличение этого показателя с 0,85 до 2,3 г/л к концу эксперимента.

3. Анализ лейкограммы выявил признаки активации иммунной системы в контрольной группе (увеличение доли палочкоядерных нейтрофилов до 12,9 % и моноцитов до 8 %), что может указывать на наличие воспалительных процессов. В опытной группе данные показатели находились в пределах нормы.

4. Анализ содержания макро- и микроэлементов в тканях и органах рыб выявил различия, связанные с составом комбикормов. Так, в кост-

ной ткани и тканях головы содержание марганца было выше в контрольной группе. Дальнейшее изучение влияния содержания марганца в кормах на его накопление в тканях представляется перспективным.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-00020 «Разработка инновационных технологических подходов к использованию альтернативного источника белка (сухая биомасса микроорганизмов – бактерий метанотрофов) в условиях высокоинтенсивного индустриального аквакультурного хозяйства».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Регуляция* антиоксидантной системы рыб биологически активными кормовыми добавками / Е.В. Спирина, Е.М. Романова, В.В. Романов, В.Н. Любомирова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 4 – С. 113–118. – DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-113-118.
2. *Иммуномодулирующие* свойства ряда биологически активных кормовых добавок / Т.М. Шленкина, Е.М. Романова, В.В. Романов, В.Н. Любомирова // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 4. – С. 130–135. – DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-130-135.
3. *Микряков Д.В., Тарлева А.Ф., Жандалгарова А.Д.* Влияние пробиотического препарата «Экофлор» на активность гликозидаз в кишечнике стерляди // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2025. – № 1 (74). – С. 186–193. – DOI: 10.31677/2072-6724-2025-74-1-186-193.
4. *Влияние* компонентов биологически активной добавки для функциональных комплексов кормления на показатели крови рыб / Л.А. Шадыева, Е.М. Романова, А.В. Васильев, Е.Е. Тураева // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. — 2023. – № 3 – С. 194–199. – DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-194-199.
5. *Особенности* развития клариевого сома (*Clarias gariepinus*, Burchell, 1822) в раннем онтогенезе / Е.Н. Пономарева, У.С. Александрова, Т.С. Гридина, А.А. Кузов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Рыбное хозяйство. – 2020. – № 2. – С. 134–141. DOI: 10.24143/2073-5529-2020-2-134-141.
6. *Замена* рыбной муки на белковые компоненты микробного, животного и растительного происхождения в кормах для двухлеток сиговых (Coregonidae) / И.Н. Остроумова, А.А. Лютиков, В.В. Костюничев [и др.] // Труды ВНИРО. – 2022. – Т. 190. – С. 105–115. – DOI: 10.36038/2307-3497-2022-190-105-115.
7. *Лютиков А.А., Шумилина А.К., Вылка М.М.* Опыт замены рыбной муки и рыбьего жира на растительные протеин и масло в стартовых кормах для сиговых рыб // Известия КГТУ. – 2021. – № 60. – С. 32–43. – DOI: 10.46845/1997-3071-2021-60-32-43.
8. *Влияния* белкового концентрата «АгроМатик» на продуктивные качества молоди радужной (*Oncorhynchus mykiss*) и янтарной (*Oncorhynchus mykiss walbaum*) форели / Д.А. Ранделин, А.И. Новокщенова, Ю.В. Кравченко [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса наука и высшее образование. – 2022. – № 3 (67). – С. 334–344. – DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-38.
9. *Показатели* роста и развития радужной форели при скармливании кормовой добавки «Бета-Флора» / Д.А. Ранделин, В.Н. Агапова, Ю.В. Кравченко, С.Ю. Агапов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса наука и высшее образование. – 2022. – № 2 (66). – С. 230–238. – DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-29.
10. *Технологии* выращивания и кормления объектов аквакультуры юга России / С.В. Пономарев, Е.А. Гамыгин, С.И. Никоноров [и др.]. – Астрахань, 2002. – 264 с.
11. *Абрамов М.Г.* Гематологический атлас. – М.: Медицина, 1985. – 344 с.
12. *Атлас* клеток крови и костного мозга / Под ред. проф. Г.И. Козинца. – М., 1998. – 160 с.
13. *Иванова Н.Т.* Атлас клеток крови рыб: сравнительная морфология и классификация форменных элементов крови рыб. – М., 1983. – 80 с.
14. *Филиппович Ю.Б., Егорова Т.А., Севастьянова Г.А.* Практикум по общей биохимии. – М., 1975. – 318 с.
15. *Trinder P.* Determination of glucose in blood using glucose oxidase with an alternative oxygen acceptor // Ann Clin Biochem. – 1969. – № 6. – P. 24–27.
16. *Zollner N., Kirsch K.* Colorimetric method for determination of total lipids // Ges. Exp. Med. – 1962. – № 135. – P. 545–561.

17. Ледвина М. Определение β-липопротеинов сыворотки крови турбидиметрическим методом // Лабораторное дело. – 1960. – № 3. – С. 13.
18. Лакин Г.Ф. Биометрия: учеб. пособие для биол. спец. вузов. – М., 1990. – 351 с.
19. Остроумова И.Н. Биологические основы кормления рыб. – СПб.: ГосНИОРХ, 2012. – 564 с.
20. Воробьев В.И. Микроэлементы и их применение в рыбоводстве. – М., 1979. – 183 с.

REFERENCES

1. Spirina E.V., Romanova E.M., Romanov V.V., Lyubomirova V.N., *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2021, No. 4, pp. 113–118, DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-113-118. (In Russ.)
2. Shlenkina T.M., Romanova E.M., Romanov V.V., Lyubomirova V.N., *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2021, No. 4, pp. 130–135, DOI: 10.18286/1816-4501-2021-4-130-135. (In Russ.)
3. Mikryakov D.V., Tarleva A.F., Zhandalgarova A.D., *Bulletin of the NGAU (Novosibirsk State Agrarian University)*, 2025, No. 1 (74), pp. 186–193, DOI: 10.31677/2072-6724-2025-74-1-186-193. (In Russ.)
4. Shadyeva L.A., Romanova E.M., Vasiliev A.V., Turayeva E.E., *Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy*, 2023, No. 3, pp. 194–199, DOI: 10.18286/1816-4501-2023-3-194-199. (In Russ.)
5. Ponomareva E.N., Alexandrova U.S., Gridina T.S., Kuzov A.A., *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Fisheries*, 2020, No. 2, pp. 134–141, DOI: 10.24143/2073-5529-2020-2-134-141. (In Russ.)
6. Ostroumova I.N., Lyutikov A.A., Kostyanichev V.V., Shumilina A.K., Vylka M.M., *PROCEEDINGS of VNIRO*, 2022, Vol. 190, pp. 105–115, DOI: 10.36038/2307-3497-2022-190-105-115. (In Russ.)
7. Lyutikov A.A., Shumilina A.K., Vylka M.M., *Scientific journal Izvestiya KSTU*, 2021, No. 60, pp. 32–43, DOI: 10.46845/1997-3071-2021-60-32-43. (In Russ.)
8. Randelin D.A., Novokshchenova A.I., Kravchenko Yu.V., Vorontsova E.S., Kuznetsova T.V., Ramazan A.K., *Izvestia NV AUK*, 2022, No. 3 (67), pp. 334–344, DOI: 10.32786/2071-9485-2022-03-38. (In Russ.)
9. Randelin D.A., Agapova V.N., Kravchenko Yu.V., Agapov S.Y., *Izvestia NV AUK*, 2022, No. 2(66), pp. 230–238, DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-29. (In Russ.)
10. Ponomarev S.V., Gamygin E.A., Nikonorov S.I., Ponomareva E.N., Grozescu Yu.N., Bakhareva A.A., *Tekhnologii vyrashchivaniya i kormleniya ob'ektov akvakul'tury yuga Rossii* (Technologies of cultivation and feeding of aquaculture facilities in the South of Russia), Astrakhan, 2002, 264 p.
11. Abramov M.G., *Gematologicheskij atlas* (Hematological atlas), Moscow: Medicine, 1985, 344 p.
12. *Atlas kletok krovi i kostnogo mozga* (Atlas of blood cells and bone marrow), Pod red. prof. G.I. Kozinca, Moscow: Triad-X, 1998, 160 p.
13. Ivanova N.T., *Atlas kletok krovi ryb: sravnitel'naya morfologiya i klassifikaciya formennyh elementov krovi ryb* (Atlas of fish blood cells: comparative morphology and classification of shaped elements of fish blood), Moscow, 1983, 184 p.
14. Filippovich Yu.B., Egorova T.A., Sevastyanova G.A., *Praktikum po obshchej biohimii* (Practicum on general biochemistry), Moscow, 1975, 318 p.
15. Trinder P., Determination of glucose in blood using glucose oxidase with an alternative oxygen acceptor, *Ann Clin-Biochem*, 1969, No. 6, pp. 24–25.
16. Zollner N., Kirsch K.Z., Colorimetric method for determination of total lipid in serum, *Ges. Exp. Med*, 1962, No. 135, 545 p.
17. Ledvina M., *Laboratory case*, 1960, No. 3, p. 13. (In Russ.)
18. Lakin G.F., *Biometriya* (Biometrics), Moscow: Higher School, 1990, 293 p.
19. Ostroumova I.N., *Biologicheskie osnovy kormleniya ryb* (Biological foundations of fish feeding), Sankt-Petersburg: GosNIORKh, 2012, 564 p.
20. Vorobyov V.I., *Mikroelementy i ih primenenie v rybovodstve* (Microelements and their application in fish farming), Moscow, 1979, 183 p.

Информация об авторах:

С.В. Пономарев, доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры «Аквакультуры и водные биоресурсы», заведующий научно-исследовательской лабораторией «Осетроводство и перспективные объекты аквакультуры»; Астраханский государственный технический университет

Ю.В. Федоровых, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент; доцент кафедры «Аквакультуры и водные биоресурсы», научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Осетроводство и перспективные объекты аквакультуры»; Астраханский государственный технический университет

А.Б. Ахмеджанова, кандидат биологических наук; доцент кафедры «Аквакультуры и водные биоресурсы», ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Осетроводство и перспективные объекты аквакультуры»; Астраханский государственный технический университет

О.А. Левина, кандидат сельскохозяйственных наук; доцент кафедры «Аквакультуры и водные биоресурсы», младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Осетроводство и перспективные объекты аквакультуры»; Астраханский государственный технический университет

П.А. Нюньков, генеральный директор ООО «Гипробiosинтез»

Н.В. Терганова, аспирант, направление обучения «Рыбное хозяйство»; ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Осетроводство и перспективные объекты аквакультуры»; Астраханский государственный технический университет

Contribution of the authors:

S.V. Ponomarev, Doctor of Biological Sciences, Professor; Professor of the Department of Aquaculture and Aquatic Bioresources, Head of the Research Laboratory of Sturgeon Farming and Promising Aquaculture Objects; Astrakhan State Technical University

Yu. V. Fedorov, PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor; Associate Professor of the Department of Aquaculture and Aquatic Bioresources, Researcher of the Research Laboratory of Sturgeon Farming and Promising Aquaculture Objects; Astrakhan State Technical University

A.B. Akhmedzhanova, Candidate of Biological Sciences; Associate Professor of the Department of Aquaculture and Aquatic Bioresources, Leading Engineer of the Research Laboratory of Sturgeon Farming and Promising Aquaculture Objects; Astrakhan State Technical University

O.A. Levina, Candidate of Agricultural Sciences; Associate Professor of the Department of Aquaculture and Aquatic Bioresources; Junior Researcher of the Research Laboratory of Sturgeon Farming and Promising Aquaculture Objects; Astrakhan State Technical University

P.A. Nyunkov, General Director of Giprobiosintez LLC

N.V. Terganova, postgraduate student, majoring in Fisheries; leading engineer, research laboratory, Sturgeon Farming and Prospective Aquaculture Objects; Astrakhan State Technical University

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.