На правах рукописи

САЛЕХ ХАТЕМ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АМИНОКИСЛОТНОЙ ДОБАВКИ L-ИЗОЛЕЙЦИНА И ДРУГИХ РАЗВЕТВЛЕННЫХ АМИНОКИСЛОТ В КОМБИКОРМАХ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ НИЛЬСКОЙ ТИЛЯПИИ (*Oreochromis niloticus*)

4.2.4. Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание учёной степени
кандидата биологических наук

Москва – 2026 г.

Работа выполнена на кафедре кормления животных ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель:	**Шаповалов Сергей Олегович,** доктор биологических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры кормления животных ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева»
Официальные оппоненты:	**Гусева Юлия Анатольевна,** доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры кормления и кормопроизводства, и.о. заведующего кафедрой аквакультуры и экологии имени А.Г. Банникова» ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии - МВА имени К.И. Скрябина»
	Кияшко Владимир Валентинович, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории аквакультуры Саратовского филиала ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (Первый казачий университет)»

Защита диссертации состоится «09» декабря 2026 г. в 10:00 ч. на заседании диссертационного совета 35.2.030.10 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет–МСХА имени К.А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 35.2.030.10, Заикина
кандидат биологических наук, доцент Анастасия Сергеевна

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Аквакультура приобретает все большее значение для обеспечения населения высококачественным животным белком, необходимым для улучшения роста, развития и здоровья (Щербина М.А., Гамыгин Е.А., 2006; Фаритов Т.А., 2016; Жигин А.В., 2021). Рыбный сектор в Сирийской Арабской республике сталкивается со многими трудностями, в первую очередь из-за высокой себестоимости производства, дефицита источников энергии, отсутствия ветеринарной помощи, а также отсутствия квалифицированных кадров. Предметом общественного обсуждения или озабоченности по поводу аквакультуры является ее экологическая устойчивость, поскольку многие виды рыб предъявляют высокие требования к пищевому белку и рыбной муке. Белок или аминокислоты, которые являются основным компонентом роста тканей, как правило, являются самыми дорогими питательными веществами в животноводстве (Жигин А.В., 2011).

Максимально эффективное использование белка и сведение к минимуму количества, необходимого в кормах, может существенно снизить производственные затраты, повысить рентабельность фермы и сократить вылов дикой рыбы, используемой для приготовления рыбной муки (Мясников Г.Г., 2020). Многие авторы отмечают, что у рыбы нет особой потребности не столько в белке как таковом, сколько в наборе незаменимых аминокислот. (Andersen *et al*., 2016; Японцев А.Э., 2021; Li. *et al*., 2020; Pedrazzani *et al*., 2020; Xing *et al*., 2023). В связи с этим, разработка, апробация и внедрение рационов с введении разветвленных форм аминокислот: изолейцина, лейцина, валина, которые способствуют повышению продуктивности и влияют на метаболические процессы организма тиляпий в среде их обитания, является актуальной проблемой современной нутрициологии и биологии.

Степень разработанности темы. Многие российские и зарубежные учёные посвятили свои исследования разработке и совершенствованию кормовых рецептов для питания рыб, а также поиску оптимального соотношения аминокислот с разветвлённой цепью (L-изолейцин, L-лейцин и L-валин) для выявления наиболее эффективного белкового состава. Основы этой гипотези были заложены в работах: Гусевой Ю.А. и др. (2020); Жигина А.В., Есавкина Ю.И. (2021); Ранделина Д.А. (2021); Jiang, Q., (2021); Аринжановой М. С. и др. (2023); Lim C. (2024); De Bandt (2022); Wu, G. (2022); Furuya, W.M (2023); Бурякова Н.П. и др. (2022); Бурякова Н.П. и Молдавского Ю.А. (2024); Привезенцева Ю.А. (2011); Пазылбекова М.Ж. и др. (2019); Ahmad, I. (2021). Нильская тиляпия (*Oreochromis niloticus*) - типичный вид пресноводной рыбы, и его выращивание было известно, как один из секторов производства продуктов питания, способный обеспечить человека питательными и безопасными продуктами питания. Этот вид является одним из важнейших объектов аквакультуры в мире (Geletu T.T., 2022; Власов В.А. и др. 2017).

Объект исследования – Нильская тиляпия (*Oreochromis niloticus)* на различных этапах продуктивного онтогенеза. Предмет исследования – влияние различий в количестве и пропорциях аминокислот с разветвлённой

цепью (L-изолейцина, L-лейцина и L-валина) в составе комбикормов на: продуктивные показатели (рост, скорость набора масса, затрат корма); качество продукции (биологическая и энергетическая ценность мышечной ткани, органолептические свойства); экономическую эффективность.

Целью исследования являлось изучение разного уровня добавленных разветвленных аминокислот, в том числе изолейцина, в рационы нильской тиляпии *O. niloticus* на продуктивные показатели в онтогенезе.

Для решения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи:**

1. Разработать калибровочные решения для «чистых» форм аминокислот: лизин, метионин, валин, треонин, триптофан, изолейцин (качественно по форме и по содержанию массовой доли активного вещества) с использованием инфракрасных методов определения в ближнем волновом диапазоне.
2. Разработать рецепты рационов с «чистыми» формами разветвленных аминокислот соответвуюших стандартам Халяль (с полным исключением мясокостной муки и продуктов её переработки).
3. Оценить показатели продуктивности при использовании экспериментальной диеты в рационах нильской тиляпии *O. niloticus* при включении в комбикорма разного уровня и соотношения разветвленных аминокислот L-изолейцина, L-лейцина, L-валина;
4. Определить биологическую, энергетическую ценность мышечной ткани нильскаой тиляпии *O. niloticus* и провести ее органолептическую оценку;
5. Сравнить мировые модели «идеального протеина» для рационов рыб нильской тиляпии *O. niloticus* с разработанной моделью «идеального протеина;
6. Провести оценку экономической эффективности при разных уровнях изолейцина в комбикорме тиляпии и разного соотношения разветвленных аминокислот L-изолейцина, L-лейцина, L-валина.

Научная новизна исследований. Впервые на кафедре кормления животных РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева в период с 2021 по 2026 год разработана и представлена комплексная калибровочная модель для быстрого определения основного вещества в кормовых аминокислотах с использованием инфракрасной спектроскопии в ближнем ИК-диапазоне. Разработаны рецепты комбикормов для производства гранулированного комбикорма без мясокостной муки с «чистыми» формами разветвленных аминокислот. Определены оптимальные рецепты комбикормов с добавлением разветвленных аминокислот: L-изолейцина, L-лейцина, L-валина. Оценены показатели продуктивности, химический состав мышечной ткани нильской тиляпии *O. niloticus*. Определена экономическая эффективность дополнительного использования «чистого» L-изолейцина, L-лейцина, L-валина в рационах при выращивании нильской тиляпии. Представлены данные для возможной коррекции модели «идеального протеина» тиляпии.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в изучении различных уровней добавления аминокислот с разветвлённой цепью (ВСАА), включая изолейцин, в рационы тиляпии для повышения продуктивных показателей в онтогенезе, что отражает теоретическую и практическую значимость анализа традиционных технологий производства комбикормов для рыб с последующим формированием направлений дальнейшего улучшения баланса аминокислот с использованием базовых «чистых» форм синтетических аминокислот. Представленные хемометрические модели предсказания концентрации аминокислот смогут помогать оперативно контролировать содержание разветвленных аминокислот: L-изолейцина, L-валина и L-лейцина в самих продуктах, а также будут отражать фактическую концентрацию, которую можно будет использовать для программ расчета рецептов и рационов.

Практическая значимость работы заключается в рекомендациях по составу комбикормов для тиляпии, разработанных на основе обобщения российского опыта в области концепции «идеального протеина». Были установлены нормы ввода и оптимальные соотношения аминокислот с разветвлённой цепью, а также эффективные методы их применения в рецептурах, основанных на использовании синтетических L-изолейцина, Lвалина и L-лейцина, что снижает себестоимость кормов и повышает продуктивность выращивания. Разработанные хемометрические модели для оперативного контроля содержания аминокислот позволяют оценить их фактическую концентрацию в кормах в условиях реального производства.

Передача российского научного опыта университету Латакии в Сирийской Арабской Республике способствует повышению качества образовательных программ и подготовке специалистов в области аквакультуры. Более того, внедрение научных рекомендаций по улучшению аминокислотного состава кормов повысит эффективность производства на местном и региональном уровнях, укрепит продовольственную безопасность и будет способствовать устойчивому развитию отрасли. Предоставление фермерам практических рекомендаций по улучшению качества кормов положительно скажется на росте производства и качестве продукции в Сирии и регионе. Эти рецептуры способствуют тому, чтобы конечный продукт (рыба) полностью соответствовал строгим стандартам Халяль и мог быть официально сертифицирован для религиозного населения мусульманских стран.

Методология и методы исследования. Методология данного исследования предполагает достижение поставленных целей и применение их путем сочетания традиционных и современных методов аквакультуры. Для изучения физиологических потребностей рыб, включая зоологические, морфологические, биохимические, гидрохимические и другие параметры, использовались как традиционные, так и современные методы аквакультуры.

Методы исследований: системный анализ, статистическая оценка, экономико-математическое моделирование, хемометрический анализ,

биохимический анализ, морфологический анализ, химический анализ мышечной ткани, дегустационная (сенсорная) оценка.

Результаты исследований обработаны с помощью статистических анализов в соответствии с общепринятыми биометрическими методами с использованием Microsoft Excel (2010, 2016). Статистическая значимость оценивалась с помощью t-критерия Стьюдента; пороговый уровень значимости был установлен на значении $p < 0,05$.

Положения, выносимые на защиту:

1. Построена хемометрическая модель предсказания концентрации и «чистых» форм аминокислот. Рассчитано калибровочное уравнение для оценки «чистой» формы изолейцина и других аминокислот в коммерческих продуктах для комбикормов.
2. Использование L-изолейцина в рационе влияет на увеличение роста и показателей продуктивности, незначительно изменяет химический состав мышечной ткани нильской тиляпии *O. niloticus*.
3. Применение L-изолейцина и других разветвленных форм аминокислот, таких как валин и лейцин, влияет на метаболические процессы и уровень ретенции азота при выращивании тиляпии.
4. Добавление L-изолейцина снижает затраты и повышает экономическую эффективность при выращивании тиляпии.
5. Модель «идеального протеина» может быть использована для обоснования физиологической потребности нильской тиляпии *O. niloticus* в изолейцине и других разветвленных аминокислотах.

Степень достоверности результатов. Современные методы научного исследования и общепринятые биометрические методики, адекватные математические модели аппроксимации экспериментальных данных и статистический анализ в Microsoft Excel обеспечивают достоверность результатов. Полученные значения оценивали при уровне значимости $p < 0,05$, как представлено в работе Плохинского Н.А., 1970.

Апробация результатов исследований. Материалы диссертации прошли апробацию на Научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева (Москва, 2023 г); Научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича (г. Москва, 3-5 июня 2024 г.); VII Международной научной конференции «Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий (Луганск, 9-10 февраля 2026 г.); Научной конференции «Современное животноводство: задачи, проблемы, решение», посвященной 80–летию кафедры «Кормление и разведение сельскохозяйственных животных» и 100–летию доктора с.-х. наук, профессора, заслуженного деятеля науки РФ Владимира Михайловича Куликова (г. Волгоград, 16-18 декабря 2025 г.); На конкурсе «За производство высококачественных кормов и кормовых добавок», проходившем в рамках 25-й и 26-й Российской агропромышленной выставки «Золотая осень» (Москва, 2023, 2024), работа удостоена двух золотых медалей.

Публикация результатов исследования. По материалам диссертации опубликовано 13 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 монография. Получены 3 патента РФ.

Личный вклад автора. Экспериментальный и практический материал диссертации автор получил лично. Он самостоятельно изучил литературу, провёл информационный поиск, выполнил экспериментальную и методологическую часть работы. Полученные данные автор интерпретировал, проанализировал и обобщил.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 222 страницах машинописного текса, включает следующие разделы: введение, обзор литературы, собственные исследования, обсуждение полученных результатов, заключение, список литературы, список сокращений и условных обозначений и приложения. Работа содержит 53 таблицы и 17 рисунков. Список литературы включает 248 источников, в том числе 186 иностранных.

2. МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Характеристика объектов и условия проведения исследований

Экспериментальная работа проведена на базе кафедр: кормления животных ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; водных биоресурсов и аквакультуры ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО ВолГАУ).

Первый опыт. Экспериментальная работа была проведена в 2024 г. на базе кафедры рыбоводства Волгоградского государственного аграрного университета. В эксперименте участвовали 200 сеголетков *O. niloticus* средней массой тела 12,0 ± 0,63 г и длиной тела 9,0 ± 0,37 см. Рыбу разделили на 4 группы с одинаковым количеством особей. С момента зарыбления аквариумов проводили мониторинг массы рыбы. Рыбу выращивали в прямоугольных стеклянных аквариумах объёмом 100 литров, заполненных дехлорированной водой. Суточную норму кормления определяли в зависимости от массы тела рыбы и температуры воды в соответствии с технологией выращивания. Кормление рыбы проводили вручную 4 раза в день. Период эксперимента — 21 сут.

Второй опыт. Экспериментальная работа проведена на базе кафедры кормления животных РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. В этом исследовании приняли участие 224 особи *O. niloticus*. Перед экспериментом рыба в течение двух недель проходила акклиматизацию. Было сформировано 7 групп рыб (1К + 6 опытных), равных по численности. С момента зарыбления аквариумов проводили мониторинг массы рыбы. Рыбу выращивали в прямоугольных стеклянных аквариумах ёмкостью 100 литров каждый, заполненных водопроводной водой. Ежедневно проводился мониторинг гидрохимического состояния воды. Воду в аквариумах меняли ежедневно на 15–20 % в ручном режиме. Температура воды поддерживалась на уровне 28 ± 1 °С с помощью погружных нагревателей с термостатическим управлением.

Содержание кислорода, температура и pH воды регистрировались ежедневно с помощью профессионального цифрового измерителя

растворённого кислорода (оксиметра) AR8406 (Chanfong, Китай). Контроль гидрохимических показателей (содержания аммония, нитритов, нитратов, карбонатной жёсткости) проводился ежедневно с помощью скрининговых тестов VladOx (МЕДОСА, Россия). Согласно вариантам эксперимента, группы рыб выращивались в каждом периоде при одинаковой плотности посадки.

Эксперимент продолжался 184 суток и включал 5 этапов выращивания. Продолжительность каждого определялась достижением критической ихтиомассы и отбором рыб для анализов: этап 1 длился 40 суток, этап 2 — 20 суток, этап 3 — 27 суток, этап 4 — 46 суток, этап 5 — 51 сутки (2-й опыт). Схема и основные параметры 2-го опыта представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Схема основных параметров второго научно-хозяйственного опыта

Группа	Период исследований, сут.	Начальная масса молоди, г	Плотность посадки рыб, шт./м³
1 К.	40/20/27/46/51	7,6/49,4/76,7/122,7/190	320/250/200/150/100
2 Оп.	40/20/27/46/51	7,6/53,1/70,5/110/169,1	320/250/200/150/100
3 Оп.	40/20/27/46/51	7,6/55,9/85,8/137,1/211	320/250/200/150/100
4 Оп.	40/20/27/46/51	7,6/59,6/93,1/144,5/215,2	320/250/200/150/100
5 Оп.	40/20/27/46/51	7,6/55,9/88/137,7/231,2	320/250/200/150/100
6 Оп.	40/20/27/46/51	7,6/51,1/84,1/151,2/251,8	320/250/200/150/100
7 Оп.	40/20/27/46/51	7,6/46,7/78,7/117,3/177,6	320/250/200/150/100

Третий опыт. Эксперимент продолжался 45 суток. По результатам 2-го опыта было сформировано 4 группы рыб. Рыбу выращивали в прямоугольных стеклянных аквариумах ёмкостью 200 литров каждый. Рыбу кормили вручную 2 раза в день. Схема и основные параметры 3-го опыта представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Схема основных параметров (третий научно-хозяйственный опыт)

Группа	Период исследований, сут.	Начальная масса молоди, г	Конечная масса молоди, г	Плотность посадки рыб, шт./м³
1 К.	45	265,2	314,90	30
4 Оп.	45	377,3	445,40	30
6 Оп.	45	362,5	400,30	30
7 Оп.	45	353,1	412,60	30

Гидрохимический анализ проб проводили на автоматизированном проточном анализаторе San++ (№ в Реестре СИ РФ 85140-22, компания Skalar, Нидерланды). Для изучения особенностей роста в начале и конце каждого периода проводили контрольные ловы с индивидуальным взвешиванием рыб на электронных весах ВЭУ-2-0,5/1 и ВЭУ-6-1/2. Рассчитывали абсолютный прирост рыб (Рикер, 1983) и относительную скорость роста (Винберг, 1956). Дополнительно для оценки скорости роста определяли коэффициент массонакопления (Км), рассчитанный по С. А. Баранову и др. (1978). Используя коэффициент массонакопления, сравнивали скорость роста рыб,

имеющих различную начальную массу тела. Аминокислотный анализ был проведён с помощью высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ; Shimadzu Co. Ltd, Киото, Япония). Для комплексной оценки биологической ценности белка мяса тиляпии были рассчитаны следующие шесть индексов: аминокислотный скор (Chemical Score — CS); индекс незаменимых аминокислот (EAAI — Essential Amino Acid Index); индекс PDCAAS (Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score); индекс DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score); индекс Карпачи–Линдера–Варга; коэффициент различия аминокислотного состава (КРАС). Расчёт экономической эффективности выполняли по формуле И. Л. Фридмана (1986).

В таблице 3 представлены изучаемые показатели и объём исследований в период 2025–2026 гг.

Таблица 3 – Объем экспериментальных исследований в 2025-2026 гг.

Показатели	Ед. изм.	Количество особей
Количество опытов	3	408 шт.
Продолжительность опыта 1 опыта 2 опыта 3	сутки сутки сутки	21 184 45
Гидрохимический режим	определений	более 100
Морфометрические показатели	8 признаков	1936 особей
Морфофизиологические показатели	7 признаков	147 особей
Морфологические показатели	7 признаков	147 особей
Химический состав мышц и корма	проб	50
Гематологические показатели	проб	50
Основной обмен	опытов	210
Скорость массонакопления	значений	210

Органолептическую оценку качества варёного мяса тиляпии проводили по пятибалльной шкале, условия дегустации — по ISO 8589. Статистический анализ. Анализ полученных данных проводился с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, США) и Statistica 10.0 (StatSoft Inc., США). Достоверность различий между средними значениями оценивали с помощью параметрического t-критерия Стьюдента (при нормальном распределении данных). Различия считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$. Все данные представлены в формате M ± m (среднее значение ± стандартная ошибка среднего).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Характеристика экспериментальных комбикормов

Было разработано семь рационов, включая контрольную диету (основной рацион), которая фактически содержала 33,1 % сырого протеина, в то время как остальные шесть содержали белок, близкий к данному значению с учётом погрешности измерения. Состав экспериментальных комбикормов:

пшеница (СП 16 %), смесь кормовая пшеничная, мука пшеничная, дрожжи пивные, лигногран, шрот подсолнечный (СП 36 %, СК 17 %), шрот соевый (СП 46 %), мука рыбная (СП 69 %), отруби пшеничные (СП 16 %), дрожжи кормовые (СП 46 %), масло подсолнечное, премикс. В таблице 4 представлен краткий анализ основных пищевых ингредиентов, проведённый перед составлением экспериментальных рационов.

Таблица 4 – Состав основного рациона по массовой доле, %

Показатель, %		Показатель, %	
ОЭ, ккал/100г	245	Метионин+цистин	1,04
М.д. сырого протеина	33,10	Треонин	1,27
М. д. сырой жира	8,01	Ca	1,77
М. д. сырая клетчатки	4,84	P	1,30
Содержание Лизина	1,95	Na	0,41
Содержание Метионина	0,61		

Экспериментальные комбикорма отличались только разным уровнем добавления ключевых аминокислот с разветвлёнными боковыми цепями. В таблице 5 показано.

Таблица 5 – Схема основных аминокислот с разветвленной боковой цепью белковой составляющей рационов

Группа	Массовая доля, %			
	сырого протеина	изолейцина	валин	лейцина
1 К.	33,10	3,90*/1,29**	4,56*/1,51**	6,98*/2,31**
2 Оп.	33,23	4,27/ 1,42 (10)	4,54/1,51 (0)	6,95/2,31 (0)
3 Оп.	33,36	4,65/ 1,55 (20)	4,53/1,51 (0)	6,92/ 2,31 (0)
4 Оп.	33,49	5,01/ 1,68 (30)	4,51/ 1,51 (0)	6,90/ 2,31 (0)
5 Оп.	33,66	4,60/ 1,55 (20)	5,38/1,81 (20)	6,86/2,31 (0)
6 Оп.	34,58	4,48/ 1,55 (20)	5,24/1,81 (20)	9,35/ 3,23 (40)
7 Оп.	35,14	5,14/ 1,81 (40)	6,02/ 2,11 (40)	9,20/ 3,23 (40)

Примечание: *массовая доля в протеине, ** массовая доля в корме

3.2. Разработка методики количественного определения изолейцина методом ИК-Фурье спектроскопии с использованием хемометрических моделей

Разработанные PLS-модели для количественного прогноза содержания основного вещества показали хорошее согласие с данными ВЭЖХ. Для лизина, метионина, валина и треонина получены высокие значения R^2 (> 0,93) и RPD (> 3,87), что свидетельствует об отличной прогностической способности моделей. Для изолейцина значение R^2 было умеренным (0,907), а значение RPD составило 3,29. Установлена принципиальная возможность применения метода FT-NIR-спектроскопии в сочетании с PLS-регрессией для экспресс-контроля содержания L-изолейцина в кормовых аминокислотах без пробоподготовки. Показано, что разработанная калибровочная модель для

изолейцина, построенная на основе 20 образцов, обладает удовлетворительной прогностической способностью ($R^2 = 0,907$) и применима для количественного анализа.

3.3. Оценка влияния уровня изолейцина и разветвленных аминокислот в комбикорме на динамику живой массы и линейного роста по этапу онтогенеза нильской тиляпии (*Oreochromis niloticus*), (первый научно-хозяйственный опыт)

В эксперименте использовали четыре рациона: контрольный (основной) и три опытных. Контрольный рацион содержал 34,00% сырого протеина. Протеин в опытных рационах был близок к этому значению с учётом погрешности анализа. Исследования роста тиляпии проводились в течение 21 дня. Показатели роста для *O. niloticus*, кормившихся в соответствии с четырьмя рационами, представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Динамика массы тела *O. niloticus* при использовании экспериментальных рационов (M - среднее значение ± SD стандартное отклонение, n = 5)

Показатели	Группа			
	1 (контроль)	2	3	4
Средняя начальная масса (г)	12,94±2,16	12,65±1,12	12,56±1,18	12,66±0,93
Средняя конечная масса (г)	30,46±3,98	$35,64±1,7^{a}$	$42,59^{a}±1,58^{a,b}$	$41,97^{a}±1,65^{a,b,c}$
Прирост массы тела (г)	17,52±0,55	$22,99±0,06^{a}$	$29,53^{a}±0,61^{a,b}$	$27,31^{b}±1,57^{a,b,c}$

*Примечание: достоверность ($P < 0,05$) здесь и далее: [a] - к 1-й контрольной группе; [b] - 3-ей к 2-й; [c] - 4-ой к 2-й группе; [d] - 4-ой к 3-й группе.

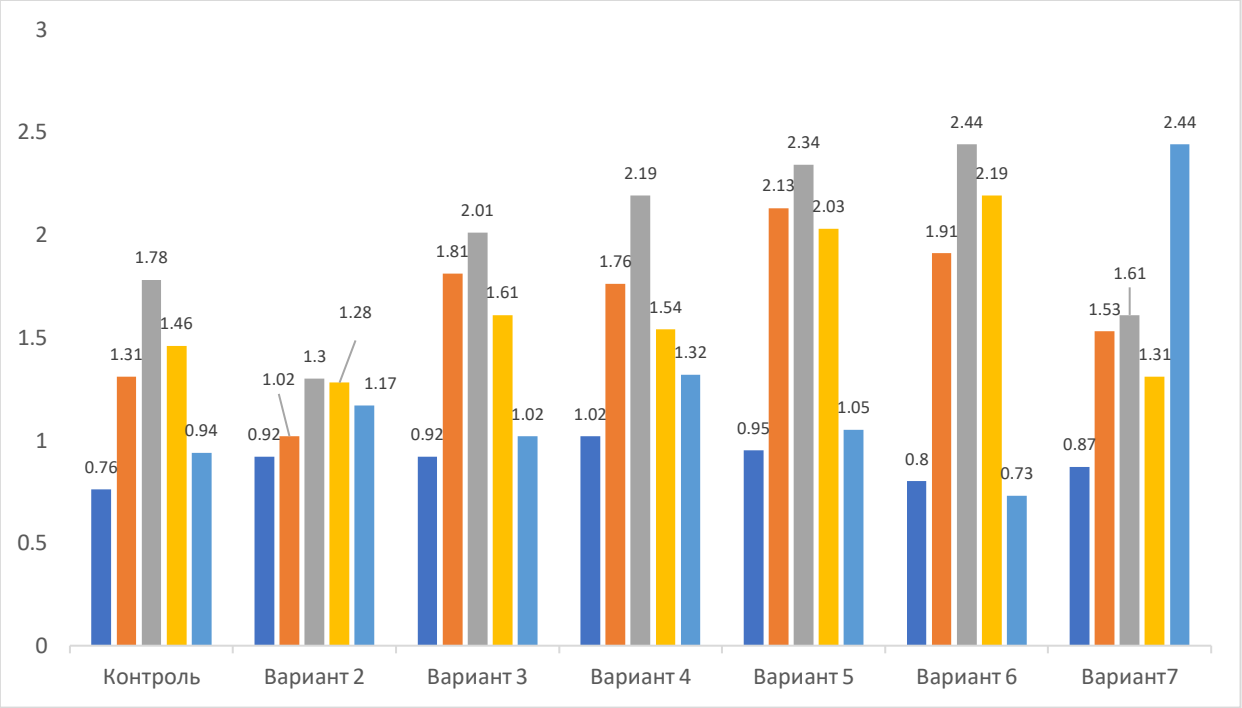
Все экспериментальные группы (2, 3 и 4) с добавлением изолейцина в дозах 10, 20 и 30 % соответственно обеспечили достоверно более высокие результаты продуктивности, чем контрольная группа (1).

3.4. Изучение влияния уровня изолейцина в комбикорме на рост и продуктивность нильской тиляпии (*Oreochromis niloticus*) (второй научно-хозяйственный опыт)

3.4.1. Рост тиляпии по этапам выращивания

Проведённые исследования по выращиванию тиляпии в течение 184 суток на комбикормах с различным уровнем и соотношением аминокислотной добавки, содержащей L-изолейцин, L-лейцин и L-валин, показали видоспецифичную реакцию рыб на изменение аминокислотного профиля корма. Масса тиляпий за весь период опыта составила: в контрольном варианте — 238,1 г; во втором варианте — 229 г; в третьем — 262,8 г; в четвёртом — 282,7 г; в пятом — 284,8 г; в шестом — 288,8 г; в седьмом — 301,8 г. Следует отметить, что эффективность применения аминокислотной добавки была наиболее выражена на втором и третьем этапах выращивания, соответствующих периоду завершения формирования желудочно-кишечного тракта и периоду максимальной потребности организма в незаменимых аминокислотах. Наиболее высокий прирост массы тиляпий в пятом и шестом вариантах, по-видимому, обусловлен использованием добавок, содержащих

20 % изолейцина и 20 % валина (вариант 5), а также 20 % изолейцина, 20 % валина и 40 % лейцина (вариант 6), что позволило оптимизировать аминокислотный состав корма по содержанию критических аминокислот с разветвлёнными боковыми цепями и обеспечить условия для эффективного синтеза мышечного белка в периоды активного роста.



Примечание: - 1этап; - 2этап; - 3этап; - 4этап; -5этап

Рисунок 1 – Среднесуточный прирост тиляпий на различных этапах выращивания, г/сут.

Наиболее эффективным по совокупности рыбоводно-биологических показателей является вариант 4, в котором добавка L-изолейцина составляла 30 %. В данном варианте обеспечивался стабильно высокий прирост ихтиомассы на протяжении всего производственного цикла, особенно в фазу активного роста (этапы 2–4), что позволяет повысить точность прогнозирования выхода товарной продукции. Максимальная скорость роста на отдельных этапах выращивания зафиксирована в вариантах 5 и 6, где добавка включала соответственно 20 % изолейцина и 20 % валина (вариант 5) либо 20 % изолейцина, 20 % валина и 40 % лейцина (вариант 6). Однако на заключительном этапе выращивания показатели этих вариантов характеризовались несколько меньшей стабильностью по сравнению с вариантом 4. Вариант 7, предусматривавший введение 40 % изолейцина, 40 % валина и 40 % лейцина, отличался наибольшим приростом в завершающий период эксперимента.

3.4.2. Экстерьерные и интерьерные показатели тиляпии (второй научно-хозяйственный опыт)

Рисунок 2. отображает изменение анатомических показателей рыб в экспериментальных группах, выраженное в процентах от контроля.

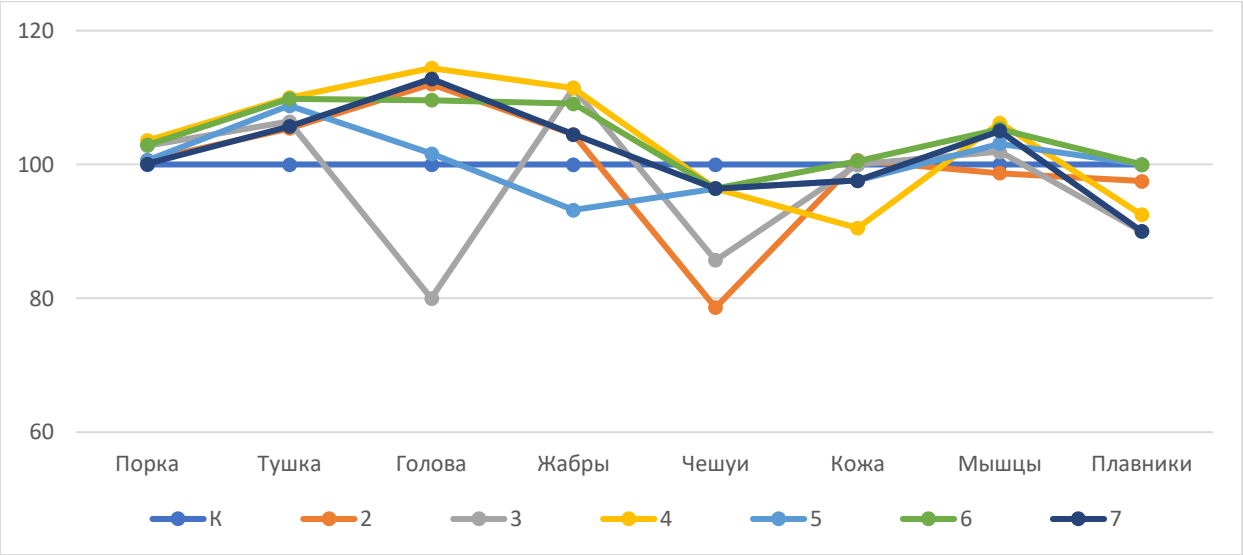
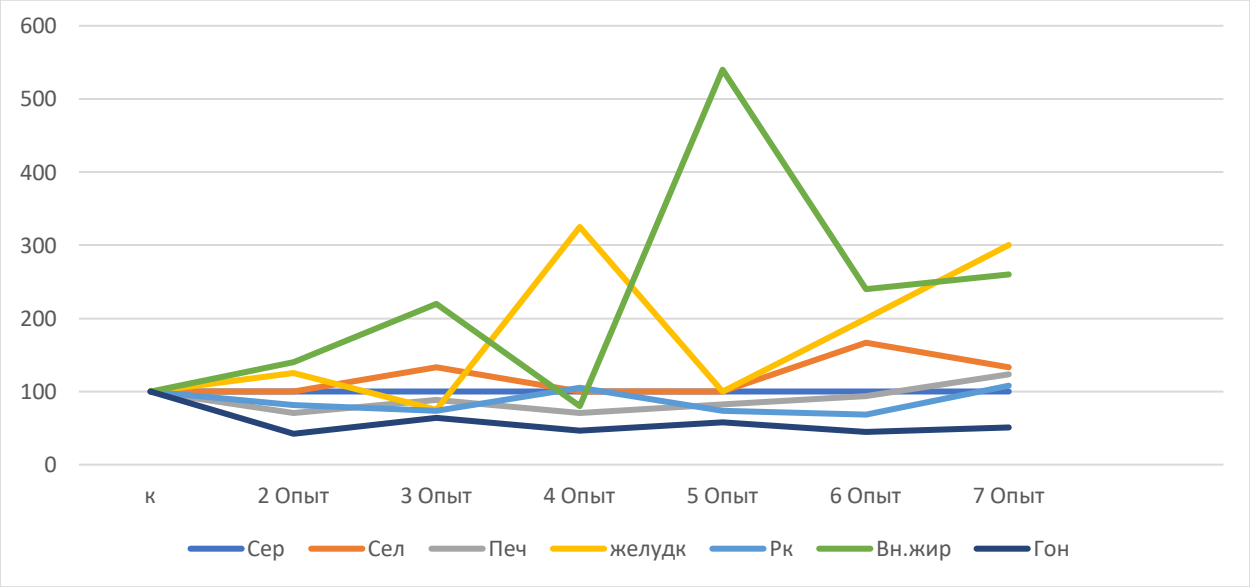


Рисунок 2 – Сравнительная оценка анатомических показателей (%) у рыб в экспериментальных группах

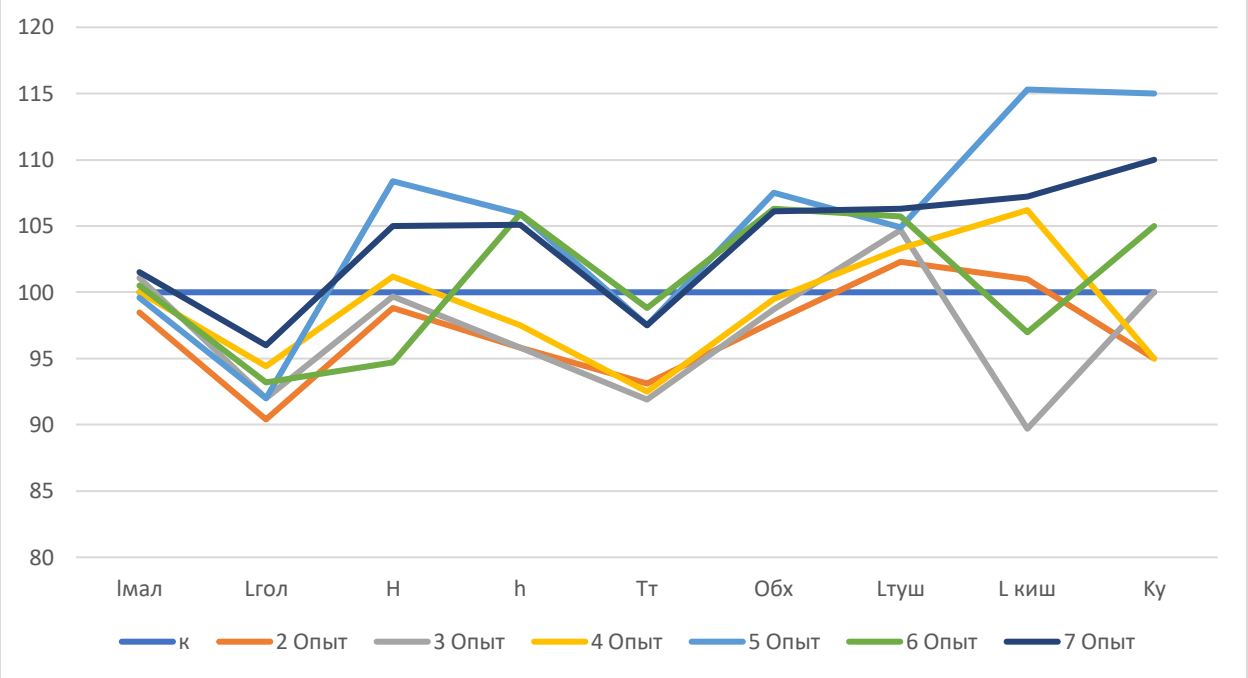
Показатели выхода потрошёной рыбы по сравнению с контролем были стабильны и находились в диапазоне 100,1–103,6 %. Наибольшие значения зафиксированы в 3-й, 4-й и 6-й группах: 102,8 %, 103,6 % и 102,9 % соответственно. В большинстве групп отмечено увеличение массы тушки, наиболее выраженное в 4-й и 6-й группах (110,0 и 109,8 % соответственно). Исключение составили 2-я и 7-я группы, где данный показатель достиг 105,4 и 105,7 % соответственно. На рисунке 3 представлены средние значения исследуемого показателя для контрольной группы.



Примечание: Сер: Сердце, Сел: селезёнка, Печ: печень, Желу: желудок, Рк: масса кишечника, Вн. жир: внутренний жир, Гон: гонады.

Рисунок 3 – Динамика массы внутренних органов рыб в экспериментальных группах относительно контроля, %

Относительная масса сердца во всех группах — на уровне контроля (100 %). По массе селезёнки отмечены колебания: увеличение в 3-й, 6-й и 7-й группах до 133,3 %, 166,7 % и 133,3 % соответственно; в остальных группах — без изменений. На рисунке 4 отображены морфометрические показатели рыб в опытных группах в процентах относительно контроля.



Примечание: lмал - длина тела, Lгол - длина головы, H - высота тела, h - высота хвостового стебля, Тт - толщина тела, Обх - обхват тела, Lтуш - длина тушки, Ку - коэффициент упитанности

Рисунок 4 – Динамика морфометрических показателей рыб в опытных группах относительно контроля, **%**

Наибольший прирост длины тела (lмал) зафиксирован в 3-й и 7-й группах (+1,1 и +1,5 %). Во 2-й группе отмечено снижение на 1,5 %, в 6-й группе отклонение составило 0,5 %, в остальных группах значения близки к контролю.

3.4.3. Рыбоводно-биологические показатели

Результаты оценки рыбопродуктивности на первом этапе выращивания тиляпии, получавшей корм с различным содержанием незаменимых аминокислот, представлены в таблице 7. Во всех экспериментальных группах (2–7) зафиксировано увеличение конечной массы тела по сравнению с контролем: прирост составил 6,5; 6,4; 10,3; 7,6; 1,6 и 4,5 г соответственно.

Таблица 7 – Рыбоводные показатели первого этапа

Показатель	Группа							
		1	2	3	4	5	6	7
Продолжительность опыта, сут.	1	40	40	40	40	40	40	40
Средняя масса рыбы начальная, г	7,60	38,00	44,50	44,40	48,30	45,60	39,60	42,50

Продолжение таблицы 7

Количество, шт.	32	32	32	32	32	32	32	32
Израсходовано корма, г	-	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
Ихтиомасса, г	243	1216	1424	1421	1546	1459	1267	1360
Выживаемость, %	-	100	100	100	100	100	100	100
Прирост ихтиомассы, г	-	973	1181	1178	1302	1216	1024	1117
Выход ихтиомассы, кг / м^3.	2,4	12,2	14,2	14,2	15,5	14,6	12,7	13,6
Суточный рацион, %	-	7,02	6,15	6,16	5,73	6,02	6,79	6,39
Затраты корма, кг/кг	-	2,11	1,74	1,74	1,57	1,69	2,00	1,84
Затрата протеина г/кг	-	717,4	591,6	591,6	533,8	574,6	680,0	625,6
Объем бассейна, м^3.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Лучшие результаты получены в 4-й группе (30 % изолейцина): максимальные значения ихтиомассы (1546 г), выхода продукции (15,5 кг/м³) и прироста (1302 г) при минимальных затратах корма (1,57 кг/кг) и протеина (533,8 г/кг). Высокие показатели отмечены также в группах 3 и 5 (14,2 и 14,6 кг/м³). Выживаемость во всех группах — 100 %. Данные по рыбопродуктивности на втором этапе выращивания представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Рыбоводные показатели выращивания тиляпии на втором этапе

Показатель	Группы						
	1	2	3	4	5	6	7
Продолжительность опыта, сут.	20	20	20	20	20	20	20
Средняя масса рыбы начальная, г	49,4	53,1	55,9	59,6	55,9	51,1	46,7
Средняя масса рыбы конечная, г	75,60	73,46	92,00	94,70	98,43	89,32	75,38
Количество, шт.	25	25	25	25	25	25	25
Израсходовано корма, г	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
Ихтиомасса, г	1890	1837	2300	2368	2461	2233	1885
Выживаемость, %	100	100	100	100	100	100	100
Прирост ихтиомассы, г	655	509	903	878	1063	956	767
Выход ихтиомассы, кг / м^3.	18,9	18,4	23,0	23,7	24,6	22,3	18,8
Суточный рацион, %	4,48	4,42	3,79	3,63	3,63	3,99	4,66
Затраты корма, кг/кг	2,14	2,75	1,55	1,60	1,32	1,47	1,83
Затрата протеина г/кг	727,6	935	527	544	448,8	499,8	622,2
Объем бассейна, / м^3.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Применение комбикормов с различным содержанием аминокислот с разветвлённой цепью способствовало повышению скорости роста тиляпии и увеличению выхода продукции в расчёте на единицу объёма (кг/м³). Самые высокие результаты были достигнуты в 5-й группе: конечная масса рыбы составила 98,43 г, прирост ихтиомассы составил 1063 г, выход составил 24,6 кг/м³ при минимальных затратах корма (1,32 кг/кг). Таким образом, корректировка аминокислотного состава рационов является эффективным способом интенсификации выращивания тиляпии в условиях замкнутого водоснабжения. Показатели третьего этапа выращивания представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Рыбоводные показатели выращивания тиляпии на третьем этапе

Показатель	Группы						
	1	2	3	4	5	6	7
Продолжительность опыта, сут.	27	27	27	27	27	27	27
Средняя масса рыбы начальная, г	76,7	70,5	85,8	93,1	88	84,1	78,7
Средняя масса рыбы конечная, г	124,70	105,70	140,10	152,10	151,20	150,00	122,30
Количество, шт.	20	20	20	20	20	20	20
Израсходовано корма, г	1870	1870	1940	1940	1940	1940	1870
Ихтиомасса, г	2494	2114	2802	3042	3024	3000	2446
Выживаемость, %	100	100	100	100	100	100	100
Прирост ихтиомассы, г	960	704	1086	1180	1264	1318	872
Выход ихтиомассы, кг / м^3.	24,9	21,1	28,0	30,4	30,2	30,0	24,5
Суточный рацион, %	3,44	3,93	3,18	2,93	3,00	3,07	3,45
Затраты корма, кг/кг	1,95	2,66	1,79	1,64	1,53	1,47	2,14
Затрата протеина г/кг	663	904,4	608,6	557,6	520,2	499,8	727,6
Объем бассейна, / м^3.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Увеличение конечной массы тела относительно контроля зафиксировано в группах 3–6 (прирост 15,4; 27,4; 26,5 и 25,3 г соответственно); снижение — во 2-й и 7-й группах (на 19 и 2,4 г). На четвёртом этапе выращивания (таблица 10) увеличение конечной массы тела относительно контроля отмечено в группах 3–6 (прирост 21,0; 25,2; 41,2 и 61,8 г соответственно); снижение — во 2-й и 7-й группах (на 20,9 и 12,4 г).

Таблица 10 – Рыбоводные показатели выращивания тиляпии на четвертом этапе

Показатель	Группы						
	1	2	3	4	5	6	7
Продолжительность опыта, сут.	46	46	46	46	46	46	46
Средняя масса рыбы начальная, г	122,7	110	137,1	144,5	137,7	151,2	117,3
Средняя масса рыбы конечная, г	190,00	169,10	211,00	215,20	231,20	251,80	177,60
Количество, шт.	15	15	15	15	15	15	15
Израсходовано корма, г	2300	2300	2340	2340	2340	2340	2300
Ихтиомасса, г	2850	2537	3165	3228	3468	3777	2664
Выживаемость, %	100	100	100	100	100	100	100
Прирост ихтиомассы, г	1010	887	1109	1061	1403	1509	905
Выход ихтиомассы, кг / м^3	28,5	25,4	31,7	32,3	34,7	37,8	26,6
Суточный рацион, %	2,13	2,39	1,95	1,89	1,84	1,68	2,26
Затраты корма, кг/кг	2,28	2,59	2,11	2,21	1,67	1,55	2,54
Затрата протеина г/кг	775,2	880,6	717,4	751,4	567,8	527	863,6
Объем бассейна, /м^3.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Добавление аминокислот с разветвлённой цепью (BCAA) в корм нильской тиляпии приводит к заметному улучшению показателей роста, повышению расчётной производительности на м³ и снижению потребления корма на килограмм прироста массы. Наибольшие результаты были зафиксированы в шестой группе, где средняя конечная масса рыбы составила 251,8 г, выход живой массы достиг 37,8 кг/м³, прирост живой массы составил 1509 г, при этом затраты корма составили 1,55 кг/кг, а белка — 527 г/кг. Пятая

группа также показала высокие результаты, достигнув конечной массы 231,2 г, выхода 34,7 кг/м³ и коэффициента затрат корма 1,67 кг/кг. Данные о продуктивности рыб на пятом этапе выращивания представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Рыбоводные показатели выращивания тиляпии на завершающем (пятом) этапе

Показатель	Группы						
	1	2	3	4	5	6	7
Продолжительность опыта, сут.	51	51	51	51	51	51	51
Средняя масса рыбы начальная, г	190,00	169,10	211,00	215,20	231,20	251,80	177,60
Средняя масса рыбы конечная, г	238,1	229	262,8	282,7	284,8	288,8	301,8
Количество, шт.	10	10	10	10	10	10	10
Израсходовано корма, г	1415	1415	1415	1720	1720	1720	1560
Ихтиомасса, г	2381	2290	2628	2827	2848	2888	3018
Выживаемость, %	100	100	100	100	100	100	100
Прирост ихтиомассы, г	481	599	518	675	536	370	1242
Выход ихтиомассы, кг / м^3	23,8	22,9	26,3	28,3	28,5	28,9	30,2
Суточный рацион, %	1,30	1,39	1,17	1,35	1,31	1,25	1,28
Затраты корма, кг/кг	2,94	2,36	2,73	2,55	3,21	4,65	1,26
Затрата протеина г/кг	999,6	802,4	928,2	867	1091,4	1581	428,4
Объем бассейна, /м^3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Максимальный прирост ихтиомассы зафиксирован в 7-й группе, где добавка аминокислот составляла 40 % изолейцина, 40 % валина и 40 % лейцина; показатель достиг 1242 г, что на 158,2 % выше контроля (481 г). Следует отметить, что затраты корма в 7-й группе были наименьшими по сравнению с другими группами. Это объясняется тем, что на данном этапе выращивания при начальной живой массе 177,6 г количество добавки покрывает аминокислотные потребности прироста, в отличие от предыдущего этапа выращивания, что подтверждает оптимальное соотношение BCAA на этом этапе.

3.4.4. Органолептический анализ мяса нильской тиляпии

Органолептическая оценка мяса тиляпии на 229-е сутки выращивания показала, что наилучшие результаты отмечены в 7-й группе, которая превзошла контроль по всем ключевым параметрам, получив максимальные баллы за нежность, сочность и вкус. В контрольной группе (базовый рацион) мясо тиляпии продемонстрировало высокие органолептические показатели: общий балл составил 4,63 ± 0,28. Продукт характеризовался высокими оценками консистенции (4,9 ± 0,2) и внешнего вида (4,7 ± 0,1), что свидетельствует о его плотности и привлекательности.

3.5. Производственная апробация оптимальных уровней изолейцина и разветвленных аминокислот в рационах нильской тиляпии (*Oreochromis niloticus*) (третий научно-хозяйственный опыт).

Динамика ростовых показателей тиляпии в третьем производственном опыте представлена в таблице 12. Наибольший абсолютный прирост (г/шт.)

зафиксирован в 4-й и 7-й группах: при добавлении 30 % изолейцина (4-я группа) показатель составил 68,10 г, при добавлении 40 % изолейцина, 40 % валина и 40 % лейцина (7-я группа) — 59,50 г. В 6-й группе (добавка 20 % изолейцина, 20 % валина и 40 % лейцина) абсолютный прирост составил 37,80 г, что ниже контрольного значения (49,70 г).

Таблица 12 – Показатели роста тиляпий за третий опыт выращивании

Показатель	Группа			
	1 к	4	6	7
Продолжительность опыта, сут.	45	45	45	45
Средняя масса рыбы начальная, г	265,2	377,3	362,5	353,1
Средняя масса рыбы конечная, г	314,90	445,40	400,30	412,60
Абсолютный прирост, г/шт.	49,70	68,10	37,80	59,50
Среднесуточный прирост, г/сут.	1,10	1,51	0,84	1,32
Км (Коэффициент массонакопления)	0,025	0,027	0,016	0,025
Относительная скорость роста, %	0,38	0,37	0,22	0,35

3.5.1. Биологическая и энергетическая ценность мяса нильской тиляпии (*Oreochromis niloticus*)

В таблице 13 приведена оценка биологической ценности белка мяса тиляпии на основе различных подходов к анализу аминокислотного состава.

Таблица 13 – Оценка биологической ценности белка согласно спектру аминокислот в мясе тиляпии

Показатель	Индексы	Группа			
		1 (К)	4	6	7
Отношение аминокислот (заменимые к незаменимым		0,98	0,97	0,96	0,95
Доля серосодержащих аминокислот, %		12,02	12,05	12,62	17,00
Доля аминокислот с разветвленной боковой цепью (сумма: изолейцина лейцина и валина), %		52,02	52,00	54,80	72,30
Аминокислотный скор	1	40,7	43	42,3	59,5
ИНАК Индекс, Осера	2	69,42	74,47	72,66	99,27
Индекс PDCAAS	3	38,63	40,85	40,22	56,53
Индекс DIAAS	4	37,4	39,6	38,9	54,7
Показатель Карпачи-Линдера-Варга	5	86,46	88,82	88,17	99,03
Коэффициент различия аминокислотного состава (КРАС)	6	0,38	0,40	0,40	0,57

Улучшение соотношения аминокислот в корме (повышение доли серосодержащих аминокислот до 17,00 % и аминокислот с разветвлённой боковой цепью до 72,30 %) в 4-й группе привело к улучшению показателей качества белка: аминокислотного скора (59,5), индекса Осера (99,27), PDCAAS (56,53), DIAAS (54,7) и индекса Карпачи (99,03). Коэффициент различия аминокислотного состава (КРАС) также достиг 0,57 против 0,38 в контроле, что подтверждает: увеличение доли серосодержащих и разветвлённых аминокислот повышает биологическую ценность и усвояемость белка мяса тиляпии.

Для интегральной оценки превосходства 7-й группы над контролем по шести индексам применён метод многомерного сравнительного анализа на основе расстояний от эталона; результаты приведены в таблице 14. Все значения были нормированы к безразмерному виду по формуле: $Z_{ij} = (X_{ij} - \min_i) / (\max_i - \min_i)$.

Таблица 14 – Математическая модель расчета интегрального показателя шести индексов, оценивающих биологическую ценность на примере контрольной группы 1 и 7 опытной группы

Показатель	Группа 1 К (X_1)	Группа 7 (X_7)
Аминокислотный скор	40,70	59,50
Индекс Осера	69,42	99,27
PDCAAS	38,63	56,53
DIAAS	37,40	54,70
Показатель Карпачи-Линдера-Варги	86,46	99,03
КРАС	0,380	0,570

В результате установлено, что расстояние до эталона составило 2,21 у.е. для контрольной группы против 0,84 у.е. для опытной группы. Расчёты показали, что по комплексу из шести индексов, оценивающих биологическую ценность, опытная группа превосходила контрольную на 62 %, что свидетельствует о более высокой сбалансированности аминокислотного состава корма и, как следствие, повышении биологической ценности мяса тиляпии.

3.6. Оценка экономической эффективности при разных уровнях изолейцина в комбикорме нильской тиляпии

Для оценки экономической эффективности применения различных уровней изолейцина в корме для нильской тиляпии была использована формула И.Л. Фридмана. В таблице 15 показана экономическая эффективность по отношению к контрольной группе, руб/м³.

Таблица 15 – Экономическая эффективность к контрольной группе, руб/м^3

Этап	Группа					
	2	3	4	5	6	7
1	900	900	1485	1080	225	630
2	-225	1845	2160	2565	1530	-45
3	-1710	1395	2475	2385	2295	-180
4	-1395	1440	1710	2790	4185	-855
5	-405	1125	2025	2115	2295	2880
Всего за 5 этапов	-585	1305	1935	2160	2070	450

Исходя из расчёта экономической эффективности, наиболее эффективными являются два варианта: корм с добавкой 20 % изолейцина и 20 % валина (группа 5), дающий максимальный средний эффект (+2160 руб/м³) и существенные скачки доходности на отдельных этапах; и корм с добавкой 30

% изолейцина (группа 4), который при немного меньшем среднем эффекте (+1935 руб/м³) обеспечивает стабильно высокую доходность на всём протяжении цикла без убытков и характеризуется как наиболее надёжный и предсказуемый.

3.7. Модель идеального протеина в кормлении тиляпии.

Согласно нашим данным, в комбикормах для тиляпии при абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг может быть установлено соотношение лизина к изолейцину на уровне 100: 98. Соотношение разветвлённых аминокислот (BCAA) лейцин: валин: изолейцин может иметь вид 175: 114: 98. В рационах для тиляпии при использовании кормового сырья местного производства модель идеального протеина по полученным данным может иметь следующий вид: соотношение Лей: Вал: Иле = 1,8: 1,2: 1. Сравнение предложенной модели на всех этапах выращивания представлено в таблице 16.

Таблица 16 – Соотношения аминокислот и отклонений от экспериментальной модели к модели Национального университета Тайваня

Группа (масса, г)	Национальный университет Тайваня (NTU)			Экспериментальное			
				Разница с моделью NTU			
	Лиз:Иле:Вал:Лей	Лей:Иле:Вал=1	Лей:Вал:Иле=1[1]	Лей:Вал:Иле[2]	Лей	Вал	Иле
Молодь до 50	100:91:82:125	1,52:1,11:1	1,37:0,90:1	1,8:1,2:1	-0,43	-0,30	0
Молодь до 150	100:84: 98:125	1,28:0,86:1	1,49:1,17:1	1,8:1,2:1	-0,31	-0,03	0
Молодь до 300	100:98:114:175	1,54:0,86:1	1,79:1,16:1	1,8:1,2:1	-0,01	-0,04	0
Товарная продукция до 450	100:91:82:125	1,52:1,11:1	1,37:0,90:1	1,8:1,2:1	-0,43	-0,30	0
Среднее значение	-	-	-	-	-0,295	-0,168	0

[1]Соотношение приведено к изолейцину = 1 для сопоставимости с экспериментальной моделью. [2]Экспериментальное соотношение (175: 114: 98) соответствует 1,8: 1,2: 1 при изолейцине = 1.

Лейцин: наиболее близкое к модели значение достигнуто у молоди до 300 г (–0,01), что подтверждает соответствие этой фазы оптимальному соотношению для максимального роста. Наибольшее отрицательное отклонение (–0,43) наблюдается у молоди до 50 г и товарной продукции, что отражает меньшую потребность в лейцине на этих этапах. Валин: молодь до 300 г также близка к модели (–0,04), тогда как у молоди и продукции до 450 г отклонение значительнее (–0,30). У молоди до 150 г валин почти соответствует модели (–0,03).

Установлено, что результатом работы является обоснование оптимального соотношения BCAA для фазы максимального роста (молодь группы массой до 300 г), которое составило лейцин : валин : изолейцин = 1,8 : 1,2 : 1. Сравнение предложенной модели с данными NTU показало практически полное совпадение для молоди до 300 г: отклонение по лейцину составило всего –0,01, по валину –0,04, что подтверждает высокую точность разработанной модели и её соответствие тайваньской школе.

Показано, что уровень протеина для данной фазы составляет 331–351 г/кг, что выше традиционно принятого уровня 310–320 г/кг, и обеспечивает

наиболее низкие затраты корма на прирост 1 кг (1,26–1,67 кг/кг). В комбикормах для тиляпии при абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг установлено соотношение лизина к изолейцину на уровне 100 : 98. Соотношение разветвлённых аминокислот (BCAA) лейцин : валин : изолейцин может быть представлено как 175 : 114 : 98. Таким образом, модель идеального протеина для тиляпии, полученная в исследовании, имеет следующий вид: лизин (100) : лейцин (175) : валин (114) : изолейцин (98), что в пересчёте на соотношение BCAA соответствует лейцин : валин : изолейцин = 1,8 : 1,2 : 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана возможность качественного распознавания и последующего количественного определения пяти незаменимых аминокислот — метионина, лизина, треонина, валина и изолейцина — методом Фурьеспектроскопии в ближней инфракрасной области (FT-NIR). Результаты, полученные с помощью калибровочных моделей частной регрессии методом наименьших квадратов (PLS), верифицировали методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), принятым в качестве эталонного. Прогнозы FT-NIR хорошо согласовывались с данными ВЭЖХ; остаточное прогностическое отклонение (RPD) превышало 1,3 во всех случаях. Спектроскопию FT-NIR можно рассматривать как простой и быстрый инструмент контроля аминокислот, поступающих с кормом.

2. Результаты эксперимента подтверждают гипотезу о дозозависимом влиянии изолейцина на продуктивность тиляпии в стартовый период выращивания. Наибольшие результаты по конечной массе (42,59 г) и абсолютному приросту (29,53 г, что на 68% выше контроля) зафиксированы в группе с уровнем изолейцина, превышающим контроль на 20%. Повышение количества до 30% не приводит к дальнейшему росту показателей, демонстрируя отсутствие линейной зависимости и выход на «плато» эффективности. Таким образом, для оптимизации рецептуры комбикормов и достижения максимальной продуктивности тиляпии в первые 21 сутки выращивания обоснованным является повышение уровня изолейцина на 20% сверх стандартных значений.

3. Общая закономерность действия добавок доказано, что эффективность включения аминокислотных добавок в рацион тиляпии за период выращивания 184 дня носит онтогенетически обусловленный и дозозависимый характер. Установлена смена приоритетных типов рационов по мере роста рыбы: на стартовом этапе максимальный эффект достигается монодобавкой изолейцина, тогда как на последующих этапах доминирующее положение занимают комбинированные аминокислотные комплексы, эффективность которых обусловлена синергическим взаимодействием изолейцина, валина и лейцина в процессах метаболизма протеина, что позволяет получить живую массу рыб на уровне 301,8г, что на 32% превышает контрольные показатели, при одновременном улучшении затраты корма (до 1,26 кг/кг) и повышении энергетической и биологической ценности филе.

4. Выявлена этапная специфика действия аминокислотных композиций на прирост ихтиомассы. Максимальная продуктивность на первом этапе зафиксирована в группе с 30%-ной монодобавкой изолейцина (увеличение на 33,9%), на втором этапе в группе с комбинацией 20% изолейцина и 20% валина (увеличение на 62,3%), на третьем и четвертом этапах в группе с тройной комбинацией (20% изолейцин и 20% валин, и 40% лейцин), где превышение контроля составило 37,3% и 49,4% соответственно. На завершающем этапе уникальный результат (превышение на 158,2%) обеспечила комбинация 40% всех трех аминокислот, что указывает на изменение метаболических потребностей организма в финальный период выращивания.

5. Установлено, что применение комбинированных аминокислотных добавок (группы 5, 6, 7) обеспечивает наибольшие показатели затраты корма (1,26–1,67 кг/кг) и

затраты протеина (428,4–567,8 г/кг). Наибольшая конечная живая масса (251,8 г, увеличена на 32,5% к контролю) и максимальный суммарный выход энергии в продукции (250,8 ккал, увеличена на 43% к контролю) достигнуты при использовании оптимизированной тройной комбинации в 6 группе. При этом наиболее высокая калорийность филе (105,6 ккал/100 г, увеличена на14,2% к контролю) отмечена в группе с монодобавкой изолейцина (группа 4), что свидетельствует о влиянии аминокислотного состава корма на качественные характеристики продукции.

6. Экспериментально подтверждена безопасность всех исследуемых количеств и комбинаций аминокислотных добавок: сохранность поголовья во всех группах на протяжении всего опыта составила 100%. Доказана нецелесообразность использования низких (10%) количеств изолейцина, не оказывающих положительного влияния на рост. Для максимизации продуктивности тиляпии и эффективности использования корма рекомендовано дифференцированное применение аминокислотных комплексов в зависимости от этапа выращивания: стартовый монодобавка изолейцина, продуктивный сбалансированная комбинация изолейцина и валина, заключительный комплексное обогащение тремя аминокислотами.

7. В результате производственной апробации установлено, что на завершающем этапе товарного выращивания нильской тиляпии (*Oreochromis niloticus*) эффективность кормовых добавок на основе разветвленных аминокислот сохраняет дозозависимый характер. Подтверждено, что влияние различных комбинаций BCAA на ростовые показатели неоднозначно и зависит от точного баланса компонентов: наибольшие результаты достигнуты при использовании 30%-ной монодобавки изолейцина, тогда как несбалансированные комплексные добавки могут приводить к снижению продуктивности.

8. Доказано, что включение в рацион 30% изолейцина (группа 4) является наиболее оптимальным для стимуляции роста товарной тиляпии. Данная добавка обеспечила максимальные показатели: абсолютный прирост составил 68,10 г, что на 37% выше контроля; среднесуточный прирост достиг 1,51 г/шт. (увеличен на 37% к контролю); коэффициент массонакопления (0,027) превысил контроль на 8%. Это свидетельствует о высокой эффективности монодобавки изолейцина для увеличения продуктивности на заключительной стадии откорма.

9. Выявлено, что комбинированные аминокислотные добавки дают неодинаковый результат, который зависит от дозы и соотношения компонентов. Высокие дозы всех трёх BCAA (40% изолейцина, 40% валина и 40% лейцина, группа 7) дали положительный сдвиг: абсолютный прирост превысил контроль на 20%. Однако монодобавка изолейцина оказалась эффективнее. Умеренные дозы комбинации (20% изолейцина, 20% валина и 40% лейцина, группа 6), напротив, обернулись худшими результатами: абсолютный прирост снизился на 24%, коэффициент массонакопления упал на 36%, а затраты корма выросли на 31,6% относительно контроля. Это говорит о дисбалансе аминокислот, который угнетает ростовые процессы.

10. Установлено, что применение 30%-ной добавки изолейцина (группа 4) обеспечивает наибольшие производственно-экономические показатели: максимальный прирост ихтиомассы (409 г, увеличена на 37,2% к контролю), наивысший выход продукции с единицы объема (13,4 кг/м³, увеличена на 42,6% к контролю), а также минимальные затраты корма (2,94 кг/кг, что на 26,9% эффективнее контроля) и затрат протеина (999,6 г/кг). При 100%-ной выживаемости во всех группах именно этот рацион продемонстрировал наибольшую конверсию питательных веществ. Для заключительного этапа товарного выращивания нильской тиляпии рекомендуется практическое применение кормовой добавки с содержанием 30% изолейцина, обеспечивающее максимальную рентабельность производства и снижение себестоимости продукции.

11. Установлено, что кормовая добавка BCAA в составе 40% изолейцина, валина и лейцина (группа 7) обеспечила максимальную энергетическую плотность мяса тиляпии 114,0 ккал/100 г, что на 20% выше контрольных значений. Это достигнуто за счёт

двукратного увеличения содержания сырого жира и значительного роста доли сырого протеина в сухом веществе при оптимальной влажности мышечной ткани. Показано, что различные составы добавок BCAA формируют две высокоэффективные стратегии откорма. Рацион с 30% изолейцина (группа 4) обеспечил максимальный прирост живой массы (увеличина на 41% к контролю), тогда как комплексная добавка BCAA (40% каждого, группа 7) дала наибольший интегральный энергетический выход с особи (увеличина на 58%). Оба варианта значительно повышают общую энергетическую ценность продукции. Установлено, что комплексная добавка BCAA (40% каждого компонента) принципиально улучшает качество белка мяса. По совокупности шести ключевых биохимических индексов, включая аминокислотный скор, индекс Осера, PDCAAS и DIAAS, биологическая ценность белка в этой группе превосходит контроль на 62%. Максимальные значения доли серосодержащих аминокислот (17,00%) и BCAA (72,30%) подтверждают сбалансированность аминокислотного профиля. Показано, что для практического применения рекомендованы две стратегии: использование 30% изолейцина для максимального выхода биомассы и комплексной добавки BCAA по 40% каждого компонента для получения продукции с исключительной питательной ценностью. Выбор зависит от целевых установок производства ориентации на объём или на качество конечного продукта. Установлено, что добавки BCAA позволяют направленно регулировать качество мяса тиляпии. Базовый рацион формирует продукт со средними характеристиками (4,6 балла). Добавка 30% изолейцина в рацион улучшает консистенцию, но не влияет на сочность и аромат, уступая сбалансированным вариантам. Оптимальный результат достигнут в группе, где добавка 20% лейцина, 20% валина, 40%изолейцина зафиксировано гармоничное улучшение всех органолептических свойств — упругая и сочная консистенция, насыщенный вкус, минимальные потери при варке, наивысшая общая оценка (4,5 балла). Максимальные дозы всех BCAA (по 40% каждой) обеспечивают высшие показатели нежности, сочности и вкуса (4,8 балла), однако выявлен антагонизм между нежностью и плотностью консистенции, что позволяет формировать продукт с заданными технологическими свойствами. В этой же группе отмечены негативные эффекты избытка жира: рыхлая консистенция, мутный бульон, риск горечи и максимальные потери при варке (3,0 балла).

12. Установлено, что обоснование оптимального соотношения BCAA для фазы максимального роста (молодь до 300 г): лейцин : валин : изолейцин = 1,8 : 1,2 : 1. Сопоставление с данными NTU выявило практически полное совпадение для этой стадии: отклонение по лейцину составило –0,01, по валину –0,04. Это подтверждает точность разработанной модели и её согласие с фундаментальными рекомендациями тайваньской школы. Оптимальный уровень протеина для данной фазы — 331–351 г/кг, что выше традиционно принятых 310–320 г/кг. Именно такие значения обеспечивают минимальные затраты корма на прирост 1 кг: 1,26–1,67 кг/кг. В комбикормах для тиляпии при абсолютном содержании изолейцина 1,81 г/кг соотношение лизина к изолейцину устанавливается на уровне 100:98, а BCAA — лейцин: изолейцин: валин — как 175:98:114. Предложенная модель идеального протеина для тиляпии имеет вид: лизин (100): лейцин (175): изолейцин (98): валин (114). В пересчёте на BCAA это соответствует лейцин: изолейцин: валин = 1,8: 1: 1,2.

13. Установлено, что в производство в первую очередь целесообразно рекомендовать варианты, соответствующие 4-й и 5-й группам при добавлении 30% изолейцина и 20% изолейцина + 20% валина. Показано, что применение добавки, соответствующей 5-й группе, обеспечивает максимальный средний экономический эффект (+2160 руб/м³) и позволяет достигать существенных скачков доходности на отдельных этапах цикла, что делает данный вариант предпочтительным в условиях, допускающих регулируемое варьирование факторов. Показано, что вариант, реализованный в 4-й группе, при незначительно меньшем среднем эффекте (+1935 руб/м³) гарантирует стабильно

высокую доходность на всём протяжении производственного цикла, не допуская убытков ни на одном из этапов, и характеризуется как наиболее надёжный и предсказуемый.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВУ

Рекомендована дифференцированная система кормления с учетом онтогенетических потребностей, предусматривающая возраст-зависимую стратегию обогащения комбикормов разветвленными аминокислотами. В стартовый период (молодь массой до 50 г, первые 40 суток) в комбикорма следует вводить монодобавку L-изолейцина в количестве 30% сверх стандартного уровня (1,68г изолейцина). Молоди в период (молодь массой 50–150 г, второй этап выращивания) в рацион необходимо вводить комбинацию 20% изолейцина и 20% валина сверх стандартного уровня (1,55 г изолейцина и 1,81 г валина). В заключительный период откорма (товарная рыба массой 300–450 г, финальный этап) рекомендуется применение высокодозовой комплексной добавки, содержащей по 40% изолейцина, валина и лейцина сверх стандартного уровня (1,81 г изолейцина, 2,11 г валина и 3,23 г лейцина); соотношение аминокислот на данном этапе возвращается к профилю, близкому к молоди (лейцин : изолейцин : валин ≈ 1,5 : 1 : 1,1). Данные рецептуры соответствуют строгим правилам Халяль и могут быть рекомендованны для производства рыбы для религиозного мусульманского населения.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

В перспективе научные исследования эффективности использования концентрата разветвленных аминокислот (ВСАА) целесообразно направить на изучение их действия на другие породы тиляпии в различных видах рыбоводства аквариумном, садковом и промышленном (УЗВ). Дальнейшая разработка темы должна включать исследования репродуктивной функции производителей и качества потомства. Реализация этих исследований позволит создать целостную научно обоснованную систему нормирования разветвленных аминокислот в кормлении тиляпии, адаптированную к различным технологическим условиям и целевым задачам производства, что станет важным вкладом в развитие отечественной аквакультуры и обеспечение продовольственной безопасности.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Buryakov, N.P. Application of near infrared spectroscopy for identification and quantitative determination of amino acids in their crystalline and salt forms in the preparation of animal feed / N.P. Buryakov, M.A. Buryakova, S.O. Shapovalov, **Saleh Hatem,** [et al.] // Agrarian Science. – 2023. – No. 12. – P. 90-94. – DOI 10.32634/0869-8155-2023-377-12-90-94.
2. **Saleh Hatem.** The effect of different levels of L-isoleucine in compound feeds on the growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) / **Saleh Hatem,** M.N. Hamwi //. Agrarian science. 2024;1(9):54-59. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-386-9-54-59.
3. **Салех Хатем.** Влияние добавок разветвленных аминокислот (ВСАА: L-изолейцин, L-валин, L-лейцин) в рацион нильской тиляпии (*Oreochromis niloticus*) на химический состав, энергетическую ценность и аминокислотный профиль мышечной ткани / **Салех Хатем,** Н.П. Буряков, Ю.И. Есавкин, С.О. Шаповалов, Д.Е. Алешин, М. Н. Долгая // Аграрная наука. – 2026. – №. 15. – С. 56-64. https://doi.org/10.32634/0869-8155-2026-406-05-56-64.
4. **Салех Хатем.** Оптимизация аминокислотного питания тиляпии на основе концепции идеального белка / **Салех Хатем,** Н.П. Буряков, Ю.И. Есавкин, С.О. Шаповалов // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2026. – №. 2. – С. 55-65.

Патенты

5. Патент № 2864965 Российская Федерация. Способ повышения продуктивности рыбы: № 2025118726: заявл. 07.07.2025: опубл. 30.06.2026 / Буряков Н.П., Шаповалов С.О., Есавкин Ю.И., **Салех Хатем**, Алешин Д.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева. – 4 с.

6. Патент № 2864967 Российская Федерация. Способ повышения продуктивности рыбы: № 2025118728: заявл. 07.07.2025: опубл. 30.06.2026 / Буряков Н.П., Шаповалов С.О., Есавкин Ю.И., **Салех Хатем**, Алешин Д.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева. – 4 с.

7. Патент № 2864975 Российская Федерация. Способ повышения продуктивности рыбы: № 2025118725: заявл. 07.07.2025: опубл. 30.06.2026 / Буряков Н.П., Шаповалов С.О., Есавкин Ю.И., **Салех Хатем**, Алешин Д.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева. – 4 с.

Публикации в других рецензируемых научных изданиях

8. Салех Хатем. Потребности рыб в разветвленных аминокислот в условиях замкнутого водоснабжения / **Салех Хатем**, С.О. Шаповалов // Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 180-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. – 2023. – С.313-316.

9. Салех Хатем Оценка влияния различных доз L-изолейцина в комбикорме на ростовые показатели молоди нильской тиляпии / **Салех Хатем,** С.О. Шаповалов, Н. П. Буряков // Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий : Сборник материалов VII международной научно-практической конференции, Луганск, 26 января – 10 2026 года. – С. 202-204.

10. Салех Хатем Влияние включения L- изолейцина и других незаменимых аминокислот в комбикорма на ростовые и рыбоводные показатели тиляпии (*Oreochromis niloticus*) / **Салех Хатем,** С.О. Шаповалов, Н.П. Буряков, Ю.И. Есавкин // Современное животноводство: задачи, проблемы, решение: материалы Национальной научно-практической конференции, г.Волгоград, 18 декабря 2025 г. – Волгоград: ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ, 2026. – С.33–40.

11. Салех Хатем. Роль L- Изолейцина в структуре потребностей перспективных нильской тиляпии в аминокислотах с разветвлённой цепью: кормовые аспекты / **Салех Хатем** // Современные тенденции селекционно-генетических, методологических и технологических подходов в аквакультуре, Дубровицы, 10–11 июня 2026 года. – Дубровицы: ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста, 2026. – с. 57- 60.

12. Салех Хатем. Влияние различных концентраций L-изолейцина в кормовых смесях на рост тиляпии / **Салех Хатем** // Материалы Международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения А.Я. Миловича, г. Москва, 3-5 июня 2024 г. – С. 229-233.

Монографии

13. Салех Хатем. Удовлетворение потребностей быстрорастущих цыплят-бройлеров и нильской тиляпии в разветвлённых аминокислотах и экзогенных протеазах / **Салех Хатем**, М.Н. Хамви, Н.П. Буряков, С.О. Шаповалов // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2026. – С. 299-319. – EDN IQAGTU. - DOI 10.46916/02062026-1-978-5-00215-476-0.