

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294>
УДК 636.085.55



Состояние и перспективы использования растительного сырья в кормах для аквакультуры (обзор)

© 2022. В. И. Пахомов^{1,2}, В. Ф. Хлыстунов¹, С. В. Брагинцев^{1,2},
О. Н. Бахчевников¹✉

¹ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград,
Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Проблемой для предприятий аквакультуры является рост цен на традиционное сырье для приготовления кормов – рыбную муку и жир. Способом решения проблемы является их замена недорогими компонентами растительного происхождения. Целью исследования является обобщение и анализ научной информации по использованию в комбикормах для аквакультуры новых видов растительного сырья, технологиям их подготовки и применения, влиянию на качество корма. Выполнен отбор и систематический обзор научной литературы по теме исследования за период 2017-2022 гг. Основными видами растительного сырья для приготовления кормов в аквакультуре являются продукты переработки наземных сельскохозяйственных растений, такие как шроты масличных культур, белковые концентраты, глютен, отходы пищевой промышленности. Оптимальным вариантом для замены в рационах рыбьего жира в настоящее время являются растительные масла. Частичная или полная замена рыбной муки и жира новыми видами растительного сырья возможна и не приводит к ухудшению здоровья рыб и скорости их роста при включении этих компонентов в рацион в рекомендованных дозах. Такая замена является экономически выгодной. Но при применении растительного сырья есть и отрицательные эффекты, такие как наличие антипитательных факторов, ограничивающие его использование в аквакультуре. Разработка рецептов экономически эффективных кормов для рыб, в которых рыбная мука и жир полностью заменены растительными компонентами, является приоритетным направлением исследований, направленных на развитие интенсивной аквакультуры.

Ключевые слова: комбикорм, протеин, липиды, заменители рыбной муки, растительные масла

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «АНЦ «Донской» (тема № 0505-2022-0007).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пахомов В. И., Хлыстунов В. Ф., Брагинцев С. В., Бахчевников О. Н. Состояние и перспективы использования растительного сырья в кормах для аквакультуры (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(3):281-294. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294>

Поступила: 24.03.2022

Принята к публикации: 16.05.2022

Опубликована онлайн: 23.06.2022

Current state and trends of the use of vegetable feedstock in aquaculture feeds (review)

© 2022. Viktor I. Pakhomov^{1,2}, Viktor F. Khlystunov¹,
Sergey V. Braginetz^{1,2}, Oleg N. Bakhchevnikov¹✉

¹Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd, Russian Federation

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Rising prices of traditional feedstock for feed preparation (fish meal and oil) is a problem for aquaculture enterprises. Their replacement with inexpensive components of vegetable origin is the way for solving the problem. The aim of the study is to generalize and analyze scientific data on using new types of vegetable feedstock in aquaculture feeds, on technologies of their preparation and use, influence on feed quality. Selection and systematic review of scientific literature on the topic of the study for the period of 2017-2022 has been carried out. The derivatives of land agricultural plant products such as oilseed meal, protein concentrates, gluten and food industry wastes are the main types of vegetable feedstock for feed preparation in aquaculture. Currently, vegetable oils are the best variants for replacing fish oil in fish diets. Partial or complete replacement of fishmeal and oil with new types of vegetable feedstock is possible and does not lead to deterioration of fish health and growth rate when these components are included in the diet at recommended doses. Such a replacement is economically advantageous. But there are negative effects in the use of vegetable feedstock, such as the presence of anti-nutritional factors

that limit its use in aquaculture. The development of recipes of cost-effective fish feeds in which fish meal and oil are completely replaced by vegetable components is a research priority for the development of intensive aquaculture.

Keywords: *formula feed, protein, lipids, fish meal substitutes, vegetable oils*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Agricultural Research Centre Donskoy (theme No. 0505-2022-0007).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declared no conflict of interest.

For citation: Pakhomov V. I., Khlystunov V. F., Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N. Current state and trends of the use of vegetable feedstock in aquaculture feeds (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(3):281-294. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294>

Received: 24.03.2022

Accepted for publication: 16.05.2022

Published online: 23.06.2022

В настоящее время в аквакультуре все большее распространение получает рыбоводство интенсивного типа, предусматривающее высокую плотность содержания рыбы в искусственных водоемах и ее полную зависимость от искусственного корма [1].

Основными компонентами кормов для рыб являются рыбная мука и рыбий (рыбный) жир [1, 2]. Первая служит источником протеина, второй – липидов. Рыбную муку, содержащую 60-72 % протеина, производят путем варки, прессования, сушки и измельчения из малоценных мелких морских рыб, которые не пригодны для потребления человеком, а также отходов переработки рыбы [1]. Рыбный жир получают путем разделения на центрифуге отходов после приготовления рыбной муки [1]. Использование этих компонентов позволяет удовлетворить основные потребности рыб в питательных веществах и обеспечить их быстрый рост.

Проблемой для предприятий интенсивной аквакультуры является рост цен на традиционное сырье для приготовления кормов – рыбную муку и жир, приведший к увеличению их стоимости и снижению рентабельности производства [3, 4]. Это связано с сокращением добычи мелкой рыбы, служащей сырьем для производства рыбной муки и жира, изменением климата и чрезмерным выловом рыбы в предыдущие годы, а также опережающим ростом спроса [5]. Поставки этих компонентов в настоящее время нестабильны, а прогнозы обещают дальнейшее сокращение их производства [6, 7].

Способом решения этой проблемы является замена рыбной муки и жира в составе корма для рыб другими доступными компонентами растительного происхождения, а именно сельскохозяйственным сырьем, стабильность поставок которого не вызывает сомнения, а стоимость не растет опережающими темпами [6, 7]. Преимуществом сырья растительного происхождения является его

высокая возобновляемость и устойчивость поставки [1]. Сложность состоит в том, что эти виды сырья должны содержать определенный набор аминокислот и жирных кислот, аналогичный их содержанию в рыбной муке и жире, что требует их комбинирования в составе корма [1, 4, 8]. Новые виды сырья для аквакультурных кормов надлежит изучать с целью точного определения их состава, необходимой предварительной подготовки и возможных ограничений при включении в состав кормов для рыб.

Это обусловило необходимость выполнения научного обзора российских и иностранных статей и систематизации имеющихся сведений о новых растительных компонентах кормов для рыб, являющихся альтернативой рыбной муке и жиру, их питательной ценности, особенностях подготовки и влиянии на свойства готового корма.

Цель исследования – обобщение и анализ информации из научных статей, посвященных использованию новых видов растительного сырья в комбикормах для аквакультуры, для получения данных о технологиях их подготовки, применения и влияния на качество кормов для рыб.

Материал и методы. Отбор и систематический обзор научной литературы по теме исследования был выполнен по методике, приведенной в работах R. J. Тоггасо [9] и С. Okoli [10].

Для отбора научных статей на английском языке выполнили поиск по ключевым словам в библиографических базах Google Scholar и ScienceDirect. Был осуществлен обзор содержания научных журналов по исследуемой тематике. При выборе статей для обзора приоритет отдавали источникам с большим количеством цитирования. Также были изучены пристатейные списки литературы отобранных публикаций для выявления дополнительных релевантных источников информации.

В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2017-2022 гг. Научные статьи, опубликованные ранее, включали в обзор лишь при отсутствии новых публикаций по конкретному аспекту темы исследования.

Основная часть. Виды растительного сырья. В качестве источника протеина в составе корма для рыб заменить рыбную муку могут различные продукты растительного происхождения (рис.) [2, 11].



Рис. Виды растительного сырья, служащие альтернативой рыбной муке и жиру в составе комбикормов для рыб: 1 – шроты масличных культур, 2 – белковые концентраты, 3 – отходы пищевой промышленности, 4 – глютен, 5 – пальмовое масло; 6 – традиционные растительные масла /

Fig. Vegetable feedstock as an alternative to fish meal and fish oil in compound feeds for aquaculture: 1 – oilseed meal, 2 – protein concentrates, 3 – food industry wastes, 4 – gluten, 5 – palm oil; 6 – traditional vegetable oils

Основными видами растительного сырья для приготовления кормов в аквакультуре являются продукты переработки наземных сельскохозяйственных растений (шроты масличных культур, белковые концентраты, глютен, отходы пищевой промышленности и др.). Оптимальным вариантом для замены в рационах рыбьего жира в настоящее время являются растительные масла (пальмовое, рапсовое, подсолнечное и др.) [12].

Шроты масличных культур. Наиболее важными белковыми компонентами растительного происхождения являются шроты из семян масличных культур, получаемые после извлечения масла из соевых бобов, хлопчатника, рапса, арахиса, семян подсолнечника [4]. Они являются недорогими и легкодоступными источниками протеина, но их использование для питания плотоядных рыб ограничено высоким содержанием крахмала и сложных углеводов, а также широкого спектра антипитательных факторов, таких как ингибиторы протеазы, фитиновая кислота, сапонины и др.

[4, 13]. Тем не менее, аминокислотный профиль масличных шротов сходен с профилем рыбной муки (табл. 1) [14].

Наибольшее использование в кормах для аквакультуры нашел соевый шрот благодаря хорошему аминокислотному профилю, легкодоступности и низкой цене [1, 15]. Установлено, что он может заменить до 30 % рыбной муки в рационе рыб, в частности лосося (*Salmo salar* L.) [16]. Но большее содержание соевого шрота в составе корма вызывает негативный эффект, отрицательно влияя на рост рыб и усвоение ими питательных веществ [17]. Это вызвано тем, что антипитательные факторы в составе шрота вызывают у рыб энтерит – повреждение слизистой оболочки кишечника [18]. Эти данные подтверждают и результаты новейших исследований. X. Liu установил, что в диете гибрида серебряного карася (*Carassius auratus gibelio*) и обыкновенного карпа (*Cyprinus carpio*) оптимальная доля соевого шрота составляет 38,5-41,8 %, а большее его содержание привело к ослаблению использования корма и ухуд-

шению показателей роста [15]. С. Zhang установил, что замена 50 % рыбной муки соевым шротом в рационе японского сибаса (*Lateolabrax japonicus*) не повлияла на показатели роста,

при большем содержании шрота наблюдалось снижение усвоения корма и активности пищеварительных ферментов, ухудшалось состояние кишечника рыб [17].

Таблица 1 – Сравнение аминокислотного профиля рыбной муки и шротов масличных культур, % (по N. Revesz и др. [4])

Table 1 – Comparison of the amino acid profile of fish meal and oilseed meal, % (N. Revesz et al. [4])

Показатель / Indicator	Рыбная мука / Fish meal	Шрот / Meal			
		соевый / soybean	хлопковый / cottonseed	рапсовый / rapeseed	подсолнечный / sunflower
Сырой протеин / Crude protein	71,2	47,7	44,3	40,6	44,1
Сырой жир / Crude fat	9,6	2,0	3,0	2,7	2,2
Незаменимые аминокислоты, (% от содержания протеина) / Essential amino acids, (% of protein content)					
Аргинин / Arginine	4,11	3,41	4,51	2,26	4,52
Гистидин / Histidine	1,76	1,26	1,15	1,09	1,18
Изолейцин / Isoleucine	3,38	2,92	1,56	1,48	2,58
Лейцин / Leucine	5,43	4,02	2,5	2,74	3,23
Лизин / Lysine	5,49	3,1	1,73	2,18	2,15
Метеонин / Methionine	2,16	0,72	0,62	0,78	1,72
Фенилаланин / Phenylalanine	3,03	2,45	2,35	1,55	2,58
Треонин / Threonine	3,0	1,92	1,44	1,72	1,72
Валин / Valine	3,81	2,53	2,05	1,96	2,58

Хлопковый шрот (побочный продукт производства хлопкового масла) также имеет значительное содержание протеина [19]. Но его применение ограничивает высокое содержание токсичного вещества – госсипола [20]. В то же время, исследования М. Yildirim показали, что для канального сома (*Ictalurus punctatus*) госсипол является сильным природным антиоксидантом, улучшая его иммунные реакции и устойчивость к болезням [21]. Кроме того, несмотря на высокое содержание протеина, для хлопкового шрота характерно низкое содержание лизина и метионина [22]. Эти факторы ограничивают применение этого вида сырья в кормах для рыб.

Рапсовый шрот является возможной заменой рыбной муке в составе комбикорма для рыб [23]. Но его применение также ограничено из-за наличия антипитательных факторов. По сообщению F. Wu, его содержание в корме для нильской тилпии (*Oreochromis niloticus*) не должно превышать 22 % [23], тогда как Е. А. Sallam сообщает о максимально приемлемом содержании в 10 % [24]. Более

высокое содержание этого шрота в корме приводит к негативным последствиям для организма рыб [23, 24].

Подсолнечный шрот обладает высокими вкусовыми качествами для рыбы и имеет низкое содержание антипитательных факторов, обладает хорошей усвояемостью протеина, а также имеет более низкую стоимость по сравнению с другими шротами [25]. Значительным недостатком этого вида корма является высокое содержание плохо усваиваемых структурных углеводов (клетчатка и лигнин), что снижает его энергетическую ценность [4, 26]. Тем не менее, он находит применение в аквакультуре. R. B. Christopher сообщает, что подсолнечный шрот может заменить соевый в рационе нильской тилпии (30 % рациона) без негативных последствий [26]. К. J. Rahmdel установил, что замена рыбной муки подсолнечным шротом в рационе карпа обыкновенного (*Cyprinus carpio*) на уровне до 75 % не оказывает негативного влияния на его рост и состав туши [27]. Таким образом, несмотря на то, что подсолнечный шрот уступает по содержанию аминокислот

не только рыбной муке, но и соевому шроту, он находит применение в кормах для рыб по причине более низкой цены, особенно в России и Казахстане [28].

В странах Африки в качестве заменителя рыбной муки используют арахисовый шрот. Он имеет высокое содержание белка (45,6 % сырого протеина). Но его применение сдерживает низкое содержание лизина – 1,62 % от общего протеина, что намного ниже его содержания в других масличных шротах [4]. Другим его недостатком является значительное поражение грибом *Aspergillus flavus*, продуцирующим афлатоксин [29]. Тем не менее, ряд ученых сообщает о положительных эффектах применения арахисового шрота в аквакультуре. В частности, U. Асаг заявляет, что этот шрот может быть эффективно использован для замены до 10 % рыбной муки в рационе радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) без каких-либо негативных последствий для ее роста, использования корма и биохимических параметров крови [30].

Таким образом, использование шротов масличных культур в качестве заменителя рыбной муки является перспективным, но их применение ограничено по причине наличия в их составе антипитательных факторов и структурных углеводов.

Перспективным способом повышения питательной ценности и снижения содержания антипитательных факторов в растительных источниках белка для аквакультуры является их ферментация, которая осуществляется путем инокуляции определенных микроорганизмов (бактерии, грибы) в сырье [31]. Ферментированные корма показали лучшую эффективность использования питательных веществ и могут повысить питательную ценность аквакормов [31, 32]. В процессе ферментации антипитательные факторы разрушаются, а биоактивные компоненты, такие как пептиды, органические кислоты, пробиотики и флавоноиды, вырабатываются [31]. Чаще всего ферментации подвергают шроты, особенно соевый, содержание белка в котором после обработки повышается на 10 % [32]. Н. Yang установил, что ферментированный соевый шрот может заменить 35 % рыбной муки в рационе большеротого окуня (*Micropterus salmoides*) [33]. Недостатком этого вида сырья является повышение его стоимости по сравнению с исходным за счет дополнительной обработки.

Протеиновые концентраты. Белковые концентраты, приготовленные путем переработки таких культур, как соя, горох, рапс, подсолнечник, а также кукурузный и пшеничный глютен могут быть конкурентоспособными альтернативами рыбной муки [6, 34]. Эти продукты имеют пониженное содержание антипитательных факторов и повышенную перевариваемость по сравнению с исходным растительным продуктом, а главное, содержание протеина в них значительно выше [4, 14].

Протеиновые концентраты, содержащие 60-85 % белка, вырабатывают в процессе спиртовой экстракции растительных продуктов, в частности шротов, в ходе которой из них удаляются антипитательные факторы и углеводы, в том числе клетчатка. Наибольшее применение в кормопроизводстве нашел соевый белковый концентрат, включающий 60-70 % сырого протеина и имеющий сбалансированный аминокислотный профиль [34, 35]. Установлено, что атлантический лосось (*Salmo salar*), в рационе которого 75 % общего белка заменено соевым белковым концентратом, показывает более быстрый рост, по сравнению с рационом, основанным на рыбной муке без риска развития кишечного энтерита [36, 37]. Результаты новейших исследований показывают, что соевый протеиновый концентрат может с успехом применяться и в рационах других видов рыб. Так, J. Zhang сообщает об успешной замене рыбной муки концентратом соевого белка в рационе молоди рисового угря (*Monopterus albus*) в количестве 26 % рациона [38], а N. Mohd Faudzi заявляет о возможности использования до 50 % этого корма в рационе гибрида группера (*Epinephelus*) [39].

Проводятся исследования по применению в аквакультуре и иных видов протеиновых концентратов. Одним из таких видов сырья является гороховый белковый концентрат [13, 35]. F. P. Willora установил, что смесь соевого и горохового белкового концентрата может заменить до 50 % рыбной муки в рационе молоди пинагора (*Cyclopterus lumpus*) без каких-либо негативных последствий для ее роста и состава туши [40]. G. Ye сообщает, что возможна замена 60 % рыбной муки на хлопковый белковый концентрат в рационе гибрида группера (*Epinephelus*) без отрицательных эффектов [41].

Таким образом, протеиновые концентраты являются перспективным видом кормового сырья. Но из-за высокой стоимости их производства, применение концентратов раститель-

ного белка в настоящее время еще не является полностью экономически целесообразным, поэтому они мало используются в качестве кормовых ингредиентов в аквакультуре [14].

Еще более высокое содержание протеина имеют продукты более глубокой переработки растительного сырья – изоляты (85-95 %) и гидролизаты (более 95 %) [35]. Эти виды сырья являются перспективными, так как содержат максимальное количество переваримого белка, но их применению препятствует очень высокая стоимость, значительно большая, чем у концентратов, и превышающая цену рыбной муки [35]. Применению этих продуктов в аквакультуре посвящено небольшое количество исследований. В частности, В. Glencross установил, что переваримость соевого изолята была выше, чем у концентрата, когда он был заменен на 40 % рыбной мукой в корме для радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) [42]. Т. А. Муранова сообщает, что соевый белковый гидролизат может быть применен в стартовых кормах для аквакультуры [43].

Еще одним потенциальным видом сырья для аквакультуры с высоким содержанием белка является клейковина (глутен), получаемая при переработке зерна пшеницы, кукурузы и других зерновых культур и содержащая 60-65 % протеина с хорошим аминокислотным профилем [8, 14]. Результаты исследований показывают, что глутен может быть включен в корма для рыб в качестве замены рыбной муки самостоятельно либо совместно с вышеописанными видами растительного сырья [4, 6]. Так, V. I. Kaur и P. K. Saxena пришли к выводу, что рыбная мука может быть заменена в рационе рыбы кукурузным глутеном на уровне 25 % без ущерба для ее роста [44]. В. Glencross установил, что включение кукурузного и пшеничного глутенов в корм для атлантического лосося (*Salmo salar*) оказало положительное влияние на скорость его роста, при этом пшеничный глутен имел лучшие характеристики переваримости, чем кукурузный [45]. А. Zaretabar сообщил, что замена рыбной муки в рационе каспийского лосося (*Salmo trutta caspius*) смесью концентрата ячменного белка (330 г/кг) и пшеничного глутена (40 г/кг) оказала положительное влияние на скорость роста рыбы [46]. Но высокая стоимость препятствует активному использованию этого вида сырья.

В целом можно сделать вывод, что достоинства и недостатки шротов (низкая стоимость, но содержание антипитательных

факторов) и белковых концентратов (отсутствие вредных веществ, но высокая цена) позволяют достигать хороших результатов при их совместном использовании в составе кормов для рыб, что подтверждают результаты некоторых исследований [14, 47, 48].

Продукты переработки люцерны. Перспективным, но пока мало используемым источником протеина для кормов в аквакультуре является люцерна (*Medicago sativa* L.) [49]. Из зеленой массы люцерны получают белковый концентрат путем выделения, очистки и сушки сока. Концентрат содержит 520 г/кг сырого протеина с высоким содержанием лизина, треонина и метионина, имеет высокое содержание витаминов и антиоксидантов, таких как каротиноиды, а также низкое содержание клетчатки [50]. Концентрат из люцерны нашел применение в животноводстве [49], но его влияние на рыб еще мало исследовано.

Тем не менее, имеющиеся немногочисленные исследования показывают положительное влияние этого вида корма на организм рыб. J. Coburn сообщает, что желтый окунь (*Perca flavescens*), в рацион которого ввели 180 г/кг протеинового концентрата люцерны, заменившего рыбную муку, имел более низкую скорость роста, но более высокую конверсию корма – +0,32 г корма/г прироста, чем рыба на контрольном рационе с рыбной мукой [50]. J. Rechulicz установил, что включение в состав корма для карпа (*Cyprinus carpio*) 5 % белкового концентрата люцерны оказало положительное влияние на скорость его роста [51]. М. А. Olvera-Novoa установил, что концентрат люцерны может с успехом заменить до 35 % рыбной муки в рационе тилапии (*Oreochromis mossambicus*), увеличив скорость ее роста, но более высокое его содержание замедляет рост рыбы [52].

D. M. Halbos исследовал влияние на рыбу не белкового концентрата, а высушенной зеленой массы люцерны, т. е. травяной муки, являющейся более дешевым сырьем [53]. Он установил, что включение в рацион карпа 10 % травяной муки не оказало отрицательного влияния и обеспечило более высокую скорость роста по сравнению с рационами 5 и 0 % травяной муки.

Таким образом, белковый концентрат из люцерны является перспективным видом корма для рыб, способным заменить в рационе часть рыбной муки, а травяная мука может быть включена в рацион всеядных рыб.

Побочные продукты производства спирта. Перспективным видом сырья для аквакультуры является побочный продукт производства спирта из зерна пшеницы, кукурузы и других видов зерна, получаемый в результате его ферментации и последующей дистилляции [54]. В России этот продукт принято называть сухая барда, за рубежом принято обозначение DDGS (Dried Distiller's Grain with Solubles – сухое сброженное зерно с растворимыми веществами). Продукт содержит 23-30 % протеина, а также является хорошим источником жира – 9 %, фосфора и витаминов, имея невысокую стоимость [54], что позволяет использовать сухую барду в аквакультуре в качестве замены рыбной муки.

Е. Li и соавторы установили, что сухую барду из кукурузы можно включать в рацион канального сомика (*Ictalurus punctatus*) в количестве 30 % без ущерба для показателей роста и эффективности использования корма, причем ее доля может быть увеличена до 40 % при условии добавления лизина [55]. Они также установили, что барду из пшеницы можно включать в рацион сомика в количестве 20 %, а при добавлении лизина – 40 %.

К. R. Oliveira установил, что сухая барда из кукурузы может полностью заменить соевый шрот в рационе молоди паку (*Piaractus mesopotamicus*), снизив стоимость корма [56]. Ее введение в рацион в количестве до 40 % положительно повлияло на конверсию корма и усвояемость протеина. С. Lim и М. Н. Li получили аналогичные результаты [57, 58].

Но сухая барда имеет и негативные свойства, в частности, высокое содержание клетчатки, что ограничивает ее применение в рационе рыб [54]. Кроме того, кукурузная барда содержит желтый пигмент ксантофилл, который может, при систематическом использовании этого корма, окрасить филе рыбы в желтый цвет, что нежелательно [59].

Таким образом, сухая барда из зерна также может служить недорогим источником протеина в составе корма для рыб, но для повышения эффективности ее нужно дополнять лизином.

Побочные продукты производства пива. При приготовлении пивного сусла из зерна ячменя отходом является пивная дробина, которую используют на корм в высушенном виде. Она содержит 19-22 % протеина. Сравнительно низкое содержание белка обуславливает необходимость ее включения в рацион

для замены рыбной муки совместно с другими видами растительного сырья с высоким содержанием протеина, например шротом [60]. По этой причине ее применение в аквакультуре пока незначительно. V. I. Kaur сообщает о том, что пивная дробина может быть с положительным эффектом включена в рацион различных рыб в количестве до 30 % [61]. D. San Martin установил, что добавление дробины в корм для дорады (*Sparus aurata*) обеспечило хорошую переваримость белка [62]. А. Estévez также сообщает об эффективности включения дробины в рацион дорады в количестве до 30 %, при этом переваримость белка была на уровне 89-95 % [63]. Это позволяет заключить, что пивная дробина имеет высокий потенциал применения в качестве недорогого источника протеина для аквакультуры.

Побочные продукты производства сахара. Среди отходов пищевой промышленности значительное место занимают отходы производства сахара – меласса (патока) и жом. Это дешевое сырье, получаемое при переработке сахарной свеклы и тростника, также имеет потенциал для использования в аквакультуре.

Использование мелассы (патоки) в кормах ограничено из-за высокой вязкости и слабительного действия. Но в небольших количествах (до 5 %) она может быть использована как связующее вещество при смешивании компонентов комбикорма, а также источник энергии. R. Singh успешно использовал тростниковую мелассу в количестве 5 % в составе комбикорма для карпа как связующее вещество [64].

Сухой жом содержит 7-10 % протеина и является более перспективным для применения в аквакультуре. R. Singh установил, что доля тростникового жома в рационе карпа может достигать 50 % без отрицательного влияния на темп его роста [64]. N. Sharma установил, что включение тростникового жома в рацион мальков индийского карпа (*Catla catla* Ham.) в количестве до 30 % обеспечило хороший темп роста и высокую выживаемость рыб [65].

Таким образом, сухой жом является перспективным кормовым сырьем для аквакультуры по причине низкой стоимости и достаточной питательной ценности.

Растительные масла. В настоящее время растительные масла считаются наиболее устойчивой альтернативой для замены рыбьего жира в составе аквакормов благодаря постоянно растущему их производству, высокой

доступности и стабильным ценам [6]. Наиболее распространенными растительными маслами, используемыми для производства кормов для рыб, являются соевое, рапсовое, подсолнечное и оливковое [6]. В настоящее время увеличивается использование в аквакультуре паль-

мового масла [6, 66]. Но замена рыбьего жира в составе корма на традиционные растительные масла может быть только частичной, так как они не могут полностью удовлетворить потребности рыб в незаменимых жирных кислотах (табл. 2) [6, 67].

Таблица 2 – Сравнение профиля жирных кислот рыбьего жира и растительных масел, % /
Table 2 – Comparison of the fatty acid profile of fish oil and vegetable oils, %

Показатель / Indicator	Рыбий жир / Fish oil	Масло / Oil			
		пальмовое / palm	подсолнечное / sunflower	соевое / soybean	рапсовое / rapeseed
Каприловая кислота (10:0) / Capric acid (10:0)	–	0,48	–	–	0,56
Лауриновая кислота (12:0) / Lauric acid (12:0)	0,7	–	0,1	0,09	0,59
Пальмитиновая кислота (16:0) / Palmitic acid (16:0)	8,2	41,6	6,3	11,1	4,04
Стеариновая кислота (18:0) / Stearic acid (18:0)	2,05	3,6	3,55	3,7	2,1
Олеиновая кислота (18:1) / Oleic acid (18:1)	12,2	40,4	21,4	22,6	57,3
Пальмитолеиновая кислота (16:1) / Palmitoleic acid (16:1)	6,4	0,2	0,1	0,18	0,1
Арахидиновая кислота (20:0) / Arachidic acid (20:0)	–	0,3	0,3	0,3	0,4
Насыщенные кислоты / Saturated acids	15	48,9	11,2	15,7	7,1
Ненасыщенные кислоты / Unsaturated acids	84	50,3	88,7	80,4	88,8

Результаты многих исследований показывают, что оптимальной является замена в составе корма 50-60 % рыбьего жира на растительное масло, дающее такие же результаты, как и рацион, содержащий 100 % рыбьего жира [67, 68, 69]. Использование традиционного растительного масла в рационе на уровне более 60 % приводит к негативным последствиям для организма рыб [69, 70]. Из традиционных растительных масел весьма эффективным в питании рыб является соевое [6, 71]. Наилучший эффект дает включение в корм оливкового масла, но его применение сдерживает высокая стоимость [72].

Новым недорогим и перспективным источником жиров для рыб является пальмовое масло, имеющее содержание жирных кислот, сходное с животными жирами. По сообщениям многих ученых, рацион с пальмовым маслом обеспечивает такую же скорость роста рыб и эффективность использования корма, как корм с эквивалентным количеством рыбьего жира [6]. При этом пальмовое масло, по мнению

некоторых исследователей, может полностью заменить рыбий жир в рационе без негативных последствий [6, 73]. Например, С. Larbi Ayisi сообщает об отсутствии негативных последствий при замене 100 % рыбьего жира в рационе нильской тиляпии пальмовым маслом [73].

Таким образом, оптимальной стратегией является замена 50-60 % рыбьего жира в рационе рыб традиционными растительными маслами, либо его замена на 80-100 % пальмовым маслом.

Положительные и отрицательные эффекты использования растительного сырья. Как было показано выше, частичная или полная замена рыбной муки и жира новыми видами растительного сырья возможна и не приводит к ухудшению здоровья рыб и скорости их роста при включении этих компонентов в рацион в рекомендованных дозах.

Положительными экономическими эффектами замены рыбной муки и рыбьего жира в составе кормов на растительные виды сырья являются их более низкая стоимость, стабильность поставок, больший выбор разных видов

сырья и его поставщиков и, соответственно, возможность быстрой и легкой замены поставщиков сырья и его видов [74, 75]. Кроме того, в отличие от рыбной муки и жира, альтернативные растительные компоненты кормов, как правило, производят в той же местности, где находится аквакультурное предприятие, что снижает транспортные издержки [75]. Эти факторы способствуют увеличению рентабельности предприятий аквакультуры в силу уменьшения себестоимости их продукции (товарной рыбы и продуктов ее переработки) за счет снижения стоимости комбикормов. Особенно экономически эффективным является включение в состав кормов дешевых побочных продуктов пищевой промышленности и частичная замена ими более дорогостоящих рыбной муки, шротов и белковых концентратов [76].

Но при применении растительного сырья есть и отрицательные эффекты, ограничивающие его использование в аквакультуре. Одним из них является высокое содержание различных антипитательных факторов, отрицательно влияющих на здоровье и производительность рыб. Следовательно, при использовании растительного сырья необходима его предварительная обработка с целью нейтрализации вредных веществ [77]. Так как многие антипитательные вещества (лектины, ингибиторы протеазы и амилазы) являются термолабильными, то их возможно нейтрализовать предварительной тепловой обработкой [78]. Эффективным способом снижения содержания антипитательных факторов и повышения переваримости растительного сырья является его экструдирование [79]. Для нейтрализации термостабильных антипитательных веществ существуют другие способы обработки [77]. В частности, возможна ферментативная обработка растительных ингредиентов (например, удаление фитатов с помощью фитазы), что повышает питательные качества таких кормов [80]. Однако некоторые антипитательные факторы, такие как фитиновая кислота, остаются в сырье и после обработки [77].

Дисбаланс в составе питательных веществ является еще одним недостатком растительных ингредиентов кормов [76, 77]. Это ограничение проявляется в профиле аминокислот и жирных кислот в сырье. Аминокислотный профиль растительных ингредиентов не полностью компенсирует потребность рыбы в незаменимых аминокислотах, в отличие от

рыбной муки [75]. Например, продукты переработки сои имеют повышенное содержание лизина, но дефицит метионина и цистеина, а кукурузный глютен – пониженное содержание лизина, но высокое – метионина [77]. Этот недостаток можно компенсировать комбинированным использованием нескольких растительных ингредиентов для коррекции баланса незаменимых аминокислот в корме. В качестве примера можно привести успешные опыты по замене рыбной муки смесью кукурузного глютена и соевого шрота [4, 77]. Но такое комбинирование может быть затруднено из-за взаимодействия различных антипитательных факторов в растительных ингредиентах.

Профиль жирных кислот в составе растительных масел также не совпадает с профилем рыбьего жира [6, 77]. Эти масла содержат мало незаменимых полиненасыщенных жирных кислот [77]. В то же время растительные масла, особенно пальмовое, содержат большее количество насыщенных жирных кислот, что приводит к снижению переваримости корма при низких температурах воды [73, 77]. Это ограничивает широкое использование растительных масел, особенно в аквакультуре умеренных широт.

При производстве комбикормов для аквакультуры следует учитывать, что растительные компоненты, являющиеся побочными продуктами промышленности, в ходе производственного процесса подвергаются термической обработке, что приводит к денатурации белков, их окислению и связыванию с другими веществами и может снизить биодоступность незаменимых аминокислот для рыбы [79, 80].

Значительной проблемой является загрязнение продукции растениеводства пестицидами и микотоксинами [77, 81]. Правильное хранение растительных ингредиентов, постоянный мониторинг и лабораторный контроль качества, а также оценка рисков необходимы для того, чтобы избежать загрязнения кормов этими внешними токсинами [81].

Заключение. На сегодняшний день возможность создания и использования кормов для рыб, в которых рыбная мука и жир полностью заменены растительными компонентами стала реальностью. Многие ученые считают, что рыбная мука уже в ближайшем будущем перестанет быть обязательным компонентом комбикормов для аквакультуры, что позволит повысить рентабельность выращивания рыбы. Хотя существуют и проблемы при расширении

использования растительных ингредиентов, многие авторы утверждают, что благодаря правильной тактике составления рациона и комбинированию в его составе различных видов растительного сырья рыбу можно кормить растительными белками и жирами без каких-либо негативных последствий.

Для более эффективного использования растительного сырья необходимо провести дополнительные исследования для поиска наилучших способов нейтрализации и удаления антипитательных факторов и иных вредных веществ. Также необходимо точно установить предельное содержание каждого вида растительных компонентов в корме для конкретного вида рыб, что позволит исключить негативное влияние на их рост и состояние. Важно также

определить наилучшие комбинации растительных компонентов, позволяющие избежать недостатка определенных незаменимых аминокислот в рационе.

Производители кормов заинтересованы в их приготовлении с наименьшими затратами. Поэтому растительные ингредиенты необходимо ранжировать в соответствии с их стоимостью и приоритетные исследования должны быть сосредоточены на более дешевых видах сырья.

Таким образом, разработка рецептов экономически эффективных кормов для рыб, в которых рыбная мука и жир полностью заменены растительными компонентами, является приоритетным направлением развития интенсивной аквакультуры.

References

1. Salin K. R., Arun V. V., Mohanakumaran Nair C., Tidwell J. H. Sustainable aquafeed. In: Hai F., Visvanathan C., Boopathy R. (eds) Sustainable Aquaculture. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future. Springer, Cham. 2018. pp. 123-151. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2_4
2. Yue K., Shen Y. An overview of disruptive technologies for aquaculture. Aquaculture and Fisheries. 2022;7(2):111-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.04.009>
3. Kim S. W., Less J. F., Wang L., Yan T., Kiron V., Kaushik S. J., Lei X. G. Meeting global feed protein demand: challenge, opportunity, and strategy. Annual Review of Animal Biosciences. 2019;7(1):221-243. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014838>
4. Revesz N., Biro J. Recent trends in fish feed ingredients – mini review. Acta Agraria Kaposváriensis. 2019;23(1):32-47. DOI: <https://doi.org/10.31914/aak.2286>
5. Olsen R. L., Hasan M. R. A limited supply of fishmeal: Impact on future increases in global aquaculture production. Trends in Food Science & Technology. 2012;27(2):120-128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.003>
6. Hodar A. R., Vasava R. J., Mahavadiya D. R., Joshi N. H. Fish meal and fish oil replacement for aqua feed formulation by using alternative sources: A review. Journal of Experimental Zoology India. 2020;23(1):13-21. URL: <https://vk.cc/cbMKaC>
7. Singh P., Paul B. N., Giri S. S. Potentiality of new feed ingredients for aquaculture: A review. Agricultural Reviews. 2018;39(4):282-291. DOI: <https://doi.org/10.18805/ag-r-1819>
8. Gasco L., Gai F., Maricchiolo G., Genovese L., Ragonese S., Bottari T., Caruso G. Fishmeal alternative protein sources for aquaculture feeds. In: Feeds for the Aquaculture Sector. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Cham. 2018. pp. 1-28. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-77941-6_1
9. Torraco R. J. Writing integrative literature reviews: Using the past and present to explore the future. Human Resource Development Review. 2016;15(4):404-428. DOI: <https://doi.org/10.1177/1534484316671606>
10. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. Communications of the Association for Information Systems. 2015;37:879-910. DOI: <https://doi.org/10.17705/1cais.03743>
11. Hua K., Cobcroft J. M., Cole A., Condon K., Jerry D. R., Mangott A., Strugnell J. M. The future of aquatic protein: implications for protein sources in aquaculture diets. One Earth. 2019;1(3):316-329. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.018>
12. Nasopoulou C., Zabetakis I. Benefits of fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds. A review. LWT. 2012;47(2):217-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.018>
13. Øverland M., Sørensen M., Storebakken T., Penn M., Krogdahl A., Skrede A. Pea protein concentrate substituting fish meal or soybean meal in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*) - Effect on growth performance, nutrient digestibility, carcass composition, gut health, and physical feed quality. Aquaculture. 2009;288(3-4):305-311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.12.012>
14. Jia S., Li X., He W., Wu G. Protein-sourced feedstuffs for aquatic animals in nutrition research and aquaculture. In: Wu G. (eds) Recent Advances in Animal Nutrition and Metabolism. Advances in Experimental Medicine and Biology, vol 1354. Springer, Cham. 2022. pp. 237-261. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85686-1_12
15. Liu X., Han B., Xu J., Zhu J., Hu J., Wan W., Miao S. Replacement of fishmeal with soybean meal affects the growth performance, digestive enzymes, intestinal microbiota and immunity of *Carassius auratus gibelio*♀ × *Cyprinus carpio*♂. Aquaculture Reports. 2020;18:100472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100472>

16. Carter C., Hauler R. Fish meal replacement by plant meals in extruded feeds for Atlantic salmon, *Salmo salar* L. *Aquaculture*. 2000;185(3-4):299-311. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00353-1](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00353-1)
17. Zhang C., Rahimnejad S., Wang Y., Lu K., Song K., Wang L., Mai K. Substituting fish meal with soybean meal in diets for Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*): Effects on growth, digestive enzymes activity, gut histology, and expression of gut inflammatory and transporter genes. *Aquaculture*. 2018;483:173-182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.10.029>
18. Krogdahl A., Gajardo K., Kortner T. M., Penn M., Gu M., Berge G. M., Bakke A. M. Soya saponins induce enteritis in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2015;63:3887-3902. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf506242t>
19. Emre N., Güroy D., Yalın F. B., Emre Y., Güroy B., Mantoğlu S., Karadal O. Growth performance, body composition, haematological and serum parameters to fish meal replacement by soybean meal and cottonseed meal in Russian Sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*). *LIMNOFISH - Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research*. 2018;4(3):169-176. DOI: <https://doi.org/10.17216/LimnoFish.460773>
20. Rinchard J., Mbahinzireki G., Dabrowski K., Lee K.-J., Garcia-Abiado M.-A., Ottobre J. Effects of dietary cottonseed meal protein level on growth, gonad development and plasma sex steroid hormones of tropical fish tilapia *Oreochromis* sp. *Aquaculture International*. 2002;10(1):11-28. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021379328778>
21. Yildirim M., Lim C., Wan P. J., Klesius P. H. Growth performance and immune response of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) fed diets containing graded levels of gossypol-acetic acid. *Aquaculture*. 2003;219(1-4):751-768. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(03\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00062-0)
22. Cheng Z. J., Hardy R. W. Apparent digestibility coefficients and nutritional value of cottonseed meal for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*. 2002;212(1-4):361-372. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(02\)00260-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00260-0)
23. Wu F., Tian J., Yu L., Wen H., Jiang M., Lu X. Effects of dietary rapeseed meal levels on growth performance, biochemical indices and flesh quality of juvenile genetically improved farmed tilapia. *Aquaculture Reports*. 2021;20:100679. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100679>
24. Sallam E. A., Matter A. F., Mohammed L. S., Azam A. E., Shehab A., Mohamed Soliman M. Replacing fish meal with rapeseed meal: potential impact on the growth performance, profitability measures, serum biomarkers, antioxidant status, intestinal morphometric analysis, and water quality of *Oreochromis niloticus* and *Sarotherodon galilaeus* fingerlings. *Veterinary Research Communications*. 2021;45(4):223-241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11259-021-09803-5>
25. Mérida S. N., Tomás-Vidal A., Martínez-Llorens S., Cedrá M. J. Sunflower meal as a partial substitute in juvenile sharpsnout sea bream (*Diplodus puntazzo*) diets: Amino acid retention, gut and liver histology. *Aquaculture*. 2010;298(3-4):275-281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.10.025>
26. Christopher R. B., Ahilan B., Cheryl A., Samuel M. Sunflower meal as an alternative protein source to replace soybean meal in the diet of GIFT strain of Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *Indian Journal of Fisheries*. 2020;67(3):82-88. DOI: <https://doi.org/10.21077/ijf.2020.67.3.91750-09>
27. Rahmdel K. J., Noveirian H. A., Falahatkar B., Lashkan A. B. Effects of replacing fish meal with sunflower meal on growth performance, body composition, hematological and biochemical indices of common carp (*Cyprinus carpio*) fingerlings. *Fisheries & Aquatic Life*. 2018;26(2):121-129. DOI: <https://doi.org/10.2478/aopf-2018-0013>
28. Бектурсунова М. Ж., Жиенбаева С. Т., Сидорова В. И., Январева Н. И. Разработка технологии производства стартовых экструдированных кормов для молод и рыб. Вестник Алматинского технологического университета. 2021;(4):10-16. DOI: <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2021-4-10-16>
29. Marroquín-Cardona A. G., Johnson N. M., Phillips T. D., Hayes A. W. Mycotoxins in a changing global environment - A review. *Food and Chemical Toxicology*. 2014;69:220-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.04.025>
30. Acar Ü., Türker A. The effects of using peanut meal in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) diets on the growth performance and some blood parameters. *Aquaculture Studies*. 2018;18(2):79-87. DOI: http://doi.org/10.4194/2618-6381-v18_2_02
31. Dawood M. A., Koshio S. Application of fermentation strategy in aquafeed for sustainable aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 2020;12(2):987-1002. DOI: <http://doi.org/10.1111/raq.12368>
32. Mukherjee R., Chakraborty R., Dutta A. Role of fermentation in improving nutritional quality of soybean meal – a review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2016;29(11):1523. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.15.0627>
33. Yang H., Bian Y., Huang L., Lan Q., Ma L., Li X., Leng X. Effects of replacing fish meal with fermented soybean meal on the growth performance, intestinal microbiota, morphology and disease resistance of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). *Aquaculture Reports*. 2022;22:100954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100954>
34. Hekmatpour F., Mozanzadeh M. T. Legumes, Sustainable Alternative Protein Sources for Aquafeeds. In: D. J. Carlos, D. A. Clemente (Eds.) *Legumes*. London: IntechOpen, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.99778>
35. Li P., Wu G. Composition of amino acids and related nitrogenous nutrients in feedstuffs for animal diets. *Amino Acids*. 2020;52:523-542. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-020-02833-4>

36. Storebakken T., Shearer K. D., Roem A. J. Growth, uptake and retention of nitrogen and phosphorus, and absorption of other minerals in Atlantic salmon *Salmo salar* fed diets with fish meal and soy-protein concentrate as the main sources of protein. *Aquaculture Nutrition*. 2000;6(2):103-108. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2095.2000.00135.x>
37. Refstie S., Storebakken T., Baeverfjord G., Roem A. J. Long-term protein and lipid growth of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed diets with partial replacement of fish meal by soy protein products at medium or high lipid level. *Aquaculture*. 2001;193(1-2):91-106. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(00\)00473-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(00)00473-7)
38. Zhang J., Zhong L., Peng M., Chu W., Liu Z., Dai Z., Hu Y. Replacement of fish meal with soy protein concentrate in diet of juvenile rice field eel *Monopterus albus*. *Aquaculture Reports*. 2019;15:100235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2019.100235>
39. Mohd Faudzi N., Yong A. S. K., Shapawi R., Senoo S., Biswas A., Takii K. Soy protein concentrate as an alternative in replacement of fish meal in the feeds of hybrid grouper, brown-marbled grouper (*Epinephelus fuscoguttatus*) × giant grouper (*E. lanceolatus*) juvenile. *Aquaculture Research*. 2018;49(1):431-441. DOI: <https://doi.org/10.1111/are.13474>
40. Willora F. P., Nadanasabesan N., Knutsen H. R., Liu C., Sørensen M., Hagen Ø. Growth performance, fast muscle development and chemical composition of juvenile lumpfish (*Cyclopterus lumpus*) fed diets incorporating soy and pea protein concentrates. *Aquaculture Reports*. 2020;17:100352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100352>
41. Ye G., Dong X., Yang Q., Chi S., Liu H., Zhang H., Tan B., Zhang S. Low-gossypol cottonseed protein concentrate used as a replacement of fish meal for juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂): Effects on growth performance, immune responses and intestinal microbiota. *Aquaculture*. 2020;524:735309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735309>
42. Glencross B., Evans D., Dods K., McCafferty P., Hawkins W., Maas R. Evaluation of the digestible value of lupin and soybean protein concentrates and isolates when fed to rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, using either stripping or settlement faecal collection methods. *Aquaculture*. 2005;245(1-4):211-20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.11.033>
43. Muranova T. A., Zinchenko D. V., Miroshnikov A. I. Hydrolysates of soybean proteins for starter feeds of aquaculture: the behavior of proteins upon fermentolysis and the compositional analysis of hydrolysates. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*. 2019;45(3):195-203. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1068162019030038>
44. Kaur V. I., Saxena P. K. Incorporation of maize gluten in supplementary feed and its impact on growth and flesh quality of some carps. *Aquaculture International*. 2005;13:555-573. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-005-7995-4>
45. Glencross B., Grobler T., Huyben D. Digestible nutrient and energy values of corn and wheat glens fed to Atlantic salmon (*Salmo salar*) are affected by feed processing method. *Aquaculture*. 2021;544:737133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737133>
46. Zaretabar A., Ouraji H., Kenari A. A., Yeganeh S., Esmaili M., Amirkolaei A. K. One step toward aquaculture sustainability of a carnivorous species: Fish meal replacement with barley protein concentrate plus wheat gluten meal in Caspian brown trout (*Salmo trutta caspius*). *Aquaculture Reports*. 2021;20:100714. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100714>
47. Rodiles A., Herrera M., Hachero-Cruzado I., Ruiz-Jarabo I., Mancera J. M., Cordero M. L., Lall S. P., Alarcón F. J. Tissue composition, blood biochemistry and histology of digestive organs in Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles fed diets containing different plant protein ingredients. *Aquaculture Nutrition*. 2015;21(6):767-779. DOI: <https://doi.org/10.1111/anu.12207>
48. Alessio B., Parma L., Mandrioli L., Sirri R., Fontanillas R. Increasing dietary plant proteins affects growth performance and ammonia excretion but not digestibility and gut histology in turbot (*Psetta maxima*) juveniles. *Aquaculture*. 2011;318(1-2):101-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.05.003>
49. Gawel E., Grzelak M. The effect of a protein-xanthophyll concentrate from alfalfa (phytobiotic) on animal production – A current review. *Annals of Animal Science*. 2012;12:281-289. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10220-012-0023-5>
50. Coburn J., Wells M. S., Phelps N. B., Gaylord T. G., Samac D. A. Acceptance of a Protein Concentrate from Alfalfa (*Medicago sativa*) by Yellow Perch (*Perca flavescens*) Fed a Formulated Diet. *Fishes*. 2021;6(2):9. DOI: <https://doi.org/10.3390/fishes6020009>
51. Rechulicz J., Ognik K., Grela E. R. The effect of adding protein-xanthophylls concentrate (PX) from lucerne (*Medicago sativa*) on growth parameters and redox profile in muscles of carp, *Cyprinus carpio* (L.). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 2014;14:697-703. DOI: https://doi.org/10.4194/1303-2712-v14_3_12
52. Olvera-Novoa M. A., Campos S. G., Sabido M. G., Palacios C. A. M. The use of alfalfa leaf protein concentrates as a protein source in diets for tilapia (*Oreochromis mossambicus*). *Aquaculture*. 1990;90(3-4):291-302. DOI: [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(90\)90253-J](https://doi.org/10.1016/0044-8486(90)90253-J)
53. Halbos D. M., Mohammed M. J., Alhamadani A. S. The effect of adding dried alfalfa powder to the diet on some growth parameters of common carp (*Cyprinus carpio* L.). *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*. 2021;25(2):352-358. URL: <https://annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/download/956/806>

54. Gyan W., Li X., He S., Lin H., Yang Q., Tan B., Dong X., Chi Sh., Liu H., Zhang Sh. A review on the use of dried distiller's grains with solubles (DDGS) in aquaculture feeds. *Annals of Animal Science*. 2022;22(1):21-42. DOI: <https://doi.org/10.2478/aoas-2021-0041>
55. Li E., Lim C., Klesius P., Cai C. Enhancement effects of dietary wheat distiller's dried grains with solubles on growth, immunity, and resistance to *Edwardsiella ictaluri* challenge of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2012;43(6):814-827. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2012.00605.x>
56. Oliveira K. R., Segura J. G., Oliveira B. A., Medeiros A. C. L., Zimba R. D., Viegas E. M. Distillers' dried grains with soluble in diets for Pacu, *Piaractus mesopotamicus* juveniles: Growth performance, feed utilization, economic viability, and phosphorus release. *Animal Feed Science and Technology*. 2020;262:114393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114393>
57. Lim C., Yildirim-Aksoy M., Klesius P. H. Growth response and resistance to *Edwardsiella ictaluri* of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2009;40(2):182-193. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2009.00241.x>
58. Li M. H., Robinson E. H., Oberle D. F., Lucas P. M. Effects of various corn distillers by-products on growth, feed efficiency, and body composition of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture Nutrition*. 2010;16(2):188-193. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2009.00650.x>
59. Li M. H., Robinson E. H., Oberle D. F., Zimba P. V. Effects of various dietary carotenoid pigments on fillet appearance and pigment absorption in channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Journal of the World Aquaculture Society*. 2007;38(4):557-563. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.2007.00130.x>
60. Archit Sh., Munish K., Gyandeeep G., Neeraj P., Varun M. A review on replacing fish meal in aqua feeds using plant and animal protein sources. *International Journal of Chemical Studies*. 2019;7(3):4732-4739. URL: <https://vk.cc/cbOujz>
61. Kaur V. I., Saxena P. K. Incorporation of brewery waste in supplementary feed and its impact on growth in some carps. *Bioresource Technology*. 2004;91(1):101-104. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00073-7)
62. San Martin D., Orive M., Iñarra B., Castelo J., Estévez A., Nazzaro J., Iloro I., Elortza F., Zufia J. Brewers' spent yeast and grain protein hydrolysates as second-generation feedstuff for aquaculture feed. *Waste and Biomass Valorization*. 2020;11(10):5307-5320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01145-8>
63. Estévez A., Padrell L., Iñarra B., Orive M., San Martin D. Brewery by-products (yeast and spent grain) as protein sources in gilthead seabream (*Sparus aurata*) feeds. *Aquaculture*. 2021;543:736921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736921>
64. Singh R., Dhawan A., Saxena P. K. Potential of press mud – a sugar factory byproduct – in supplementary diets and its impact on fish growth. *Bioresource Technology*. 1999;67(1):61-64. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00067-X)
65. Sharma N., Hassan S. S., Ansal M. D. Incorporation of press mud: A sugar factory byproduct in semi-intensive carp polyculture system and its effect on fish growth and survival. *Journal of Entomology and Zoology Studies*. 2019;7(4):192-199. URL: <https://www.entomoljournal.com/archives/2019/vol7issue4/PartD/7-3-321-512.pdf>
66. Fountoulaki E., Vasilaki A., Hurtado R., Grigorakis K., Karacostas I., Nengas I., Ringos G., Kotzamanis Y., Venon B., Alexis M. N. Fish oil substitution by vegetable oils in commercial diets for gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.); effect on growth performance, flesh quality and fillet fatty acid profile. Recovery of fatty acid profiles by a fish oil finishing diet under fluctuating water temperature. *Aquaculture*. 2009;289(3-4):317-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2009.01.023>
67. Wassef E. A., Saleh N. E., El-Hady H. A. E. Vegetable oil blend as alternative lipid resources in diets for gilthead seabream, *Sparus aurata*. *Aquaculture International*. 2009;17(5):421-435. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-008-9213-7>
68. Petropoulos I. K., Thompson K. D., Morgan A., Dick J. R., Tocher D. R., Bell J. G. Effects of substitution of dietary fish oil with a blend of vegetable oils on liver and peripheral blood leukocyte fatty acid composition, plasma prostaglandin E2 and immune parameters in three strains of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture Nutrition*. 2009;15(6):596-607. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2008.00627.x>
69. Harshavardhan M. A., Aanand S., Kumar J. S. S., Senthilkumar V. Comparative evaluation of commercial vegetable oil, fish oil, palm oil and groundnut oil as a lipid source in maturation and reproductive performance of fancy koi, *Cyprinus carpio* var. koi. *Aquaculture*. 2021;545:737248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737248>
70. Mourente G., Good J. E., Bel J. G. Partial substitution of fish oil with rapeseed, linseed and olive oils in diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.): effects on flesh fatty acid composition, plasma prostaglandins E2 and E2a immune function and effectiveness of a fish oil finishing diet. *Aquaculture Nutrition*. 2005;11(1):25-40. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2004.00320.x>
71. Alhazzaa R., Nichols P. D., Carter C. G. Sustainable alternatives to dietary fish oil in tropical fish aquaculture. *Reviews in Aquaculture*. 2019;11(4):1195-1218. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12287>
72. Hazreen-Nita M. K., Kari Z. A., Mat K., Rusli N. D., Sukri S. A. M., Harun H. C., Dawood M. A. Olive oil by-products in aquafeeds: Opportunities and challenges. *Aquaculture Reports*. 2022;22:100998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100998>
73. Ayisi C. L., Zhao J. L. Recent developments in the use of palm oil in aquaculture feeds: a review. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2014;3(6):259-264. URL: <https://vk.cc/cbUL8H>

74. Larbi Ayisi C., Zhao J., Wu J. W. Replacement of fish oil with palm oil: Effects on growth performance, innate immune response, antioxidant capacity and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). PLoS one. 2018;13(4):e0196100. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196100>
75. Glencross B. D., Baily J., Berntssen M. H., Hardy R., MacKenzie S., Tocher D. R. Risk assessment of the use of alternative animal and plant raw material resources in aquaculture feeds. Reviews in Aquaculture. 2020;12(2):703-758. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12347>
76. Daniel N. A review on replacing fish meal in aqua feeds using plant protein sources. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies. 2018;6(2):164-179. URL: <https://www.fisheriesjournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartC/6-1-35-823.pdf>
77. Bandara T. Alternative feed ingredients in aquaculture: Opportunities and challenges. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2018;6(2):3087-3094. URL: <https://www.entomoljournal.com/archives/2018/vol6issue2/PartAJ/6-1-130-287.pdf>
78. Drew M. D., Borgeson T. L., Thiessen D. L. A review of processing of feed ingredients to enhance diet digestibility in finfish. Animal Feed Science and Technology. 2007;138(2):118-136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.019>
79. Alam M. S., Kaur J., Khaira H., Gupta K. Extrusion and Extruded Products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2016;56(3):445-473. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
80. Vielma J., Mäkinen T., Ekholm P., Koskela J. Influence of dietary soy and phytase levels on performance and body composition of large rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and algal availability of phosphorus load. Aquaculture. 2000;183(3-4):349-362. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00299-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00299-9)
81. Abdallah M. F., Girgin G., Baydar T. Occurrence, prevention and limitation of mycotoxins in feeds. Animal Nutrition and Feed Technology. 2015;15(3):471-490. DOI: <https://doi.org/10.5958/0974-181x.2015.00048.7>

Сведения об авторах

Пахомов Виктор Иванович, доктор техн. наук, и.о. директора, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com; зав. кафедрой «Технологии и оборудование переработки продукции АПК», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», пл. Гагарина 1, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344010, e-mail: reception@donstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

Хлыстунов Виктор Федорович, доктор техн. наук, ученый секретарь по механизации и электрификации, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8476-9663>

Брагинцев Сергей Валерьевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com; доцент кафедры «Проектирование и технический сервис транспортно-технологических систем», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», пл. Гагарина 1, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344010, e-mail: reception@donstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

✉ **Бахчевников Олег Николаевич**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Information about the authors

Viktor I. Pakhomov, DSc in Engineering, Director, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com; Head of the Department «Technologies and equipment for processing of agricultural products », Don State Technical University, 1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344010, e-mail: reception@donstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

Viktor F. Khlystunov, DSc in Engineering, academic secretary on mechanization and electrification, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8476-9663>

Sergey V. Braginets, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com; associate professor at the Department «Design and Maintenance of Transport and Technological Systems», Don State Technical University, 1 Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation, 344010, e-mail: reception@donstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

✉ **Oleg N. Bakhchevnikov**, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vnptim@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author