

DOI 10.17516/1997-1389-0393

EDN: ORAYUP

УДК 639.3.043.2

Amino Acid Composition of Prospective Food Items for Rainbow Trout Aquaculture in Krasnoyarsk Region

Anzhelika A. Kolmakova^a and Vladimir I. Kolmakov^{*a, b}

^a*Institute of Biophysics SB RAS
Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”
Krasnoyarsk, Russian Federation*
^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.07.2021, received in revised form 14.12.2021, accepted 12.02.2022

Abstract. Trout farming has a potential for becoming the primary source of high-quality fish products for the resident population of Krasnoyarsk Krai. Rainbow trout aquaculture is economically profitable if cheap balanced feed based on local ingredients is available. The article presents data on the composition of amino acids in imported and locally produced commercial fish feed, as well as alternative sources, such as flour, seed meal, by-products of biotechnological production, and aquatic organisms from the water bodies of Krasnoyarsk and the Yenisei River. We conclude that zooplankton and *Gammarus lacustris* G. O. Sars 1863 can provide rainbow trout with a diet balanced in amino acids, with the exception of methionine. The studied feed components from local plant biomass, by-products of biotechnological production, river macrozoobenthos and phytoplankton from local water bodies can be used as protein supplements for designing rainbow trout diets. Information presented in the article will be useful for fish farmers and practitioners involved in the development of new domestic fish feed.

Keywords: amino acids, rainbow trout, fish feed, fishmeal, diet, aquaculture.

Acknowledgements. The results were obtained with the financial support of the Krasnoyarsk Regional State Autonomous Institution “Krasnoyarsk Regional Fund for the Support of Scientific and Scientific and Technical Activities” as part of research under the project “Development of import-substituting technologies for salmon aquaculture in the conditions of the Krasnoyarsk Territory”. An automatic

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: vkolmakov@sfu-kras.ru
ORCID: 0000-0003-4926-1212 (Kolmakova A.)

amino acid analyzer LA8080 Hitachi in the shared facility of the Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”, was used in the study.

Citation: Kolmakova A. A., Kolmakov V. I. Amino acid composition of prospective food items for rainbow trout aquaculture in Krasnoyarsk region. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(3), 363–377. DOI: 10.17516/1997-1389-0393



Состав аминокислот в перспективных компонентах питания радужной форели в условиях аквакультуры Красноярского края

А. А. Колмакова^а, В. И. Колмаков^{а, б}

^аИнститут биофизики СО РАН,
ФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”
Российская Федерация, Красноярск
^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Форелеводство может стать основой для обеспечения населения Красноярского края высококачественной рыбной продукцией. Для экономически эффективного выращивания радужной форели в сибирских условиях необходимо разработать дешевые корма на основе местных компонентов со сбалансированным содержанием аминокислот. В статье представлены данные о составе аминокислот в коммерческих кормах для рыб от зарубежных и местных производителей, в муке сельскохозяйственных растений, шроте масличных культур, побочных продуктах биотехнологического производства, а также фитопланктоне, зоопланктоне, макрозообентосе из водоемов Красноярска и реки Енисей. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что зоопланктон и *Gammarus lacustris* G. O. Sars 1863 могут обеспечить сбалансированное по аминокислотам питание радужной форели за исключением метионина. Исследованные кормовые компоненты из местного растительного сырья, побочные продукты биотехнологического производства, речной макрозообентос и фитопланктон красноярских водоемов могут быть использованы при разработке рационов питания радужной форели в качестве кормовых белковых добавок. Предполагается, что представленная в статье информация будет полезна для рыбоводов и практиков, занимающихся разработкой новых отечественных кормов для рыб.

Ключевые слова: аминокислоты, радужная форель, корм для рыб, рыбная мука, рацион питания, аквакультура.

Благодарности. Результаты получены при финансовой поддержке краевого государственного автономного учреждения “Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности” в рамках выполнения научных исследований и разработок по проекту “Разработка импортозамещающих технологий для аквакультуры лососевых рыб в условиях Красноярского

края”. В исследовании использовано оборудование ЦКП ФИЦ КНЦ СО РАН автоматический аминокислотный анализатор LA8080 Hitachi.

Цитирование: Колмакова, А. А. Состав аминокислот в перспективных компонентах питания радужной форели в условиях аквакультуры Красноярского края / А. А. Колмакова, В. И. Колмаков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(3). С. 363–377. DOI: 10.17516/1997-1389-0393

Введение

В зарубежной литературе и некоторых русскоязычных изданиях радужную форель относят к роду *Oncorhynchus* (*O. mykiss*, Walbaum, 1792, Salmonidae, Salmoniformes). Однако генетические исследования показали, что радужная форель достаточно далеко дивергировала от типичных представителей рода *Oncorhynchus* (Зелинский, Махров, 2001). Поэтому в отечественной литературе этот сложный полиморфный вид, отличающийся фенотипическим и генетическим разнообразием, принято называть *Parasalmo* (*Oncorhynchus*) *mykiss* (Pavlov et al., 2019). В настоящее время в мировой аквакультуре используются десятки пород радужной форели, из них семь в России, которые отличаются пониженным уровнем генетического разнообразия по сравнению с природными популяциями этого вида (Артамонова и др., 2016).

Несмотря на сложности таксономической и селекционной идентификации радужной форели, этот вид является основным объектом пресноводного рыбоводства в России и Красноярском крае на протяжении последних десятилетий. Успешность выращивания данного вида с целью получения товарной продукции связана с его высокой адаптивной способностью и скоростью роста в условиях аквакультуры. Даже в суровых сибирских климатических условиях товарное выращивание радужной форели индустриальным (садковым) или пастбищным способом может приносить существенную экономическую прибыль для хозяйствующих субъектов.

В практике садкового выращивания радужной форели в Красноярском крае реализованы разные модели, из которых можно выделить три основные. Первая модель – в незамерзающих теплых водах водоемов-охладителей тепловых энергетических станций в холодное время года, как правило, с сентября по июнь. Например, в подводящем канале Назаровской ГРЭС или Берешском водохранилище (водоем-охладители Березовской ГРЭС). Вторая модель – круглогодичное выращивание на незамерзающих зимой участках рек, расположенных после гидростанций. Например, на незамерзающем участке реки Енисей в районе поселка Березовка и острова Отдыха города Красноярска. Третья модель – круглогодичное выращивание на глубоководных участках заливов Красноярского водохранилища (например, в районе поселка Приморск). Во всех моделях садкового способа основное питание рыбы получают за счет искусственного кормления.

Пастбищное выращивание, как правило, осуществляется в безрыбных непроточных малых водоемах в течение периода открытой воды с апреля по октябрь. При посадке в водоем весной рыбы около 100 г ее вес осенью может достигать 500–800 г. То есть темп роста форели довольно высокий. Основу спектра питания при пастбищном способе выращивания составляет природный рачковый зоопланктон и макрозообентос.

Таким образом, Красноярский край обладает богатыми и подходящими для выращи-

вания форели водными объектами. Однако разведение радужной форели в крае не получает должного развития из-за отсутствия на рынке эффективных дешевых отечественных кормов. Обладающие достойным качеством импортные сухие комбинированные корма и рыбная мука, широко применяемая для искусственного питания рыб, имеют растущий спрос на мировом рынке и высокие цены. В сложившейся ситуации представляется актуальным поиск новых перспективных компонентов для рационов питания радужной форели в сибирских условиях.

В мировой литературе последних лет в качестве компонентов искусственного питания форели предлагается использовать широкий спектр объектов: наземные и водные растения, водные и наземные беспозвоночные животные, микроорганизмы, побочные продукты мясного и биотехнологического производства и др. (напр., Mastoraki et al., 2020; Yang et al., 2021). Следовательно, на территории Красноярского региона, богатого водными биологическими ресурсами, обладающего высококоразвитой промышленностью и сельским хозяйством, имеются хорошие перспективы для развития производства экономически выгодных полноценных рационов или компонентов питания форели из местного сырья.

Пищевая и потребительская ценность товарной форели во многом определяется сбалансированным составом незаменимых и заменимых аминокислот (АК) в теле рыб. Поэтому корм для рыб считается полноценным, если в нем присутствуют все незаменимые и заменимые АК, причем также в сбалансированном состоянии (Li et al., 2009). В практике аквакультуры принято, что состав АК в корме должен соответствовать составу АК тела определенного вида рыб, этим кормом питающегося (Mambrini, Kaushik, 1995). Под составом АК традиционно понимают

“процентный состав”, где содержание каждой АК приводится в процентах от суммарного содержания АК. Поэтому обязательным этапом при разработке эффективных рационов питания должен быть сравнительный анализ состава АК компонентов корма. Каждая АК выполняет в организме определенную роль. Для хищной форели даже небольшой недостаток в рационе отдельных АК может привести к резкому снижению скорости роста и развития рыб.

Цель работы – оценить возможность включения в рацион радужной форели дешевых местных кормовых компонентов для сбалансированности аминокислотного состава питания при выращивании товарной рыбы в сибирских условиях. Для достижения цели был определен состав АК в местных перспективных кормовых объектах и проведено его сравнение с составом АК в теле радужной форели, эталонной рыбной муки и импортных гранулированных сухих кормов. Предполагается, что полученная информация будет востребована рыбоводами и практиками-биотехнологами при создании доступных местных кормов.

Методика

Был проанализирован состав АК 9-ти видов импортных сухих гранулированных кормов и 3-х видов экструдированных кормов местного производства, которые применяются на практике для искусственного вскармливания взрослых разновозрастных групп форелей (за исключением личинок и мальков). Данные корма были предоставлены в неповрежденной промышленной упаковке сибирскими предприятиями, занимающимися разведением радужной форели. Названия кормов были зашифрованы.

В естественном ареале обитания радужная форель предпочитает питаться рач-

ковым зоопланктоном и макрозообентосом (Kasumyan, Tinkova, 2013). Пробы зоопланктона и макрозообентоса отбирались классическими гидробиологическими методами из реки Енисей. Считается, что состав АК водных беспозвоночных (зоопланктон, макрозообентос) в естественных условиях генетически предопределен, однако может существенно меняться в течение вегетационного сезона под влиянием изменчивых условий питания. Поэтому отбор проб зоопланктона и макрозообентоса проводили еженедельно с мая по октябрь. В лаборатории организмы макрозообентоса трех доминантных групп (гаммарусы Gammaridea, личинки ручейников Trichoptera, личинки хирономид Chironomidae) отбирали из нефиксированных проб, определяли и помещали в стаканы с фильтрованной водой для очищения их кишечника на 24 ч. Затем с поверхности тел животных удаляли лишнюю влагу с помощью фильтровальной бумаги. Пробы фитопланктона отбирали в течение вегетационного сезона из небольших по размерам мезотрофного и эфтрофного водоемов города Красноярск.

В качестве частичной замены традиционной рыбной муки для кормления форели предлагается применять муку подсолнечника, льна и пшеницы, рапсовый и рыжиковый шроты, пшеничный глютен, послеспиртовую барду и пивные дрожжи. Выбор на эти пищевые объекты был сделан исходя из их доступности и невысокой цены на региональном рынке. В литературе имеются сведения о возможности применения данных пищевых компонентов в питании рыб (Кононова и др., 2016; Kolmakov, Kolmakova, 2020). Растительные (шроты, мука) и микробиологические компоненты (барда послеспиртовая, дрожжи) были предоставлены сотрудниками сельскохозяйственных предприятий и Красноярского государственного аграрного университета.

Среднюю пробу высушивали и измельчали в ступке. Высушивание проб проводили в сушильном шкафу при температуре 60–65 °С до воздушно-сухого состояния. Подготовленные пробы хранили в эксикаторе. Для определения АК в пробе проводили гидролиз в 6 N растворе соляной кислоты. Навеску пробы массой от 3 до 5 мг взвешивали в виале (объем 2 мл), приливали 1–1,5 мл раствора 6 N соляной кислоты. Виалу продували аргоном (для вытеснения воздуха), плотно закручивали крышкой и помещали в предварительно нагретую до температуры 110 °С песочную баню на 22 ч. После завершения гидролиза виалы охлаждали до комнатной температуры, взбалтывали и содержимое переносили на фильтр. Стенки виалы дважды промывали дистиллированной водой. Смывы также переносили на фильтры. Фильтрат выпаривали в выпарительной чашке на кипящей водяной бане до образования мокрого осадка. Затем к осадку, добавляли 2 мл дистиллированной воды и снова выпаривали для удаления следов соляной кислоты. Выпаренные образцы хранили в эксикаторе над гранулированной щелочью (NaOH или KOH) до анализа. Перед анализом сухой гидролизат (пробу), содержащий смесь аминокислот, растворяли в буфере из расчета 1 мг исходного белка в 1 мл буфера с pH 2,2. Как правило, пробы растительного и животного происхождения содержат в своем составе гидрофобные вещества, отравляющие колонку и мешающие разделению. Для освобождения от них использовали картриджи, заполненные слабогидрофобным силикагелем. Через картридж (Диапак С-1) пропускали раствор гидролизата в 5 %-ном растворе диметилсульфоксида в буфере, используемом для разведения проб. Перед анализом пробу фильтровали через фильтр с размером пор 0,45 мкм.

Определение состава АК проводили на автоматическом анализаторе LA8080

Hitachi (Япония) методом ВЭЖХ с постколоночной модификацией нингидрином (Moore, Stein, 1954). Сущность метода заключается в расщеплении белков на АК с помощью гидролиза, последующим разделением смеси аминокислот на хроматографической колонке, смешиванием элюата с нингидрином для проведения реакции с получением окрашенных продуктов и детектированием компонентов фотометрическим детектором. Для количественной оценки АК непосредственно перед анализом серии проб в тех же условиях проводили анализ стандартной смеси аминокислот с известной концентрацией (Pickering calibration standart). В результате получали хроматограммы с пиками семнадцати АК: лизин, гистидин, аргинин, треонин, валин, метионин, изолейцин, лейцин, фенилаланин, аспарагиновая кислота, пролин, серин, глютаминовая кислота, глицин, аланин, цистин, тирозин. В процессе кислотного гидролиза триптофан практически полностью разрушался, цистеин окислялся в цистин, аспарагин и глутамин превращались в аспарагиновую и глютаминовую кислоту соответственно. Многомерное непараметрическое шкалирование состава пищевых объектов выполняли в R с помощью пакета *vegan* (R Core Team, 2020).

Результаты

Из табл. 1 и рис. 1 следует, что по составу незаменимых и заменимых АК потребностям радужной форели наиболее соответствовали принятая в качестве эталона среди кормов рыбная мука и зоопланктон красноярских водоемов. Однако если у рыбной муки состав АК был ближе всех к составу форели и практически полностью соответствовал ее пищевым потребностям, то у зоопланктона было достоверно меньше незаменимого метионина, чем требуется радужной форели для сба-

лансированного питания ($p < 0,05$). В исследованных на состав АК пробах зоопланктона по биомассе доминировали *Daphnia pulicaria* Forbes, 1893 (Cladocera), *Cyclops abyssorum* G.O. Sars, 1863 (Copepoda: Cyclopoida) и *Diaptomus cyaneus* Gurney, 1909 (Copepoda: Calanoida).

В целом по суммарному процентному составу незаменимых АК речной макрозообентос и зоопланктон красноярских водоемов были близки (табл. 1), но по содержанию отдельных АК потребностям форели наиболее соответствовал зоопланктон. В составе АК зоопланктона содержание метионина и цистеина было на порядок больше, чем у макрозообентоса из р. Енисей (Trichoptera+Gammaridea+Chironomidae). Пробы смешанного речного макрозообентоса содержали недостаточно метионина, цистеина и пролина для потребности форели, а тирозин присутствовал в избытке (табл. 1). Особенно большой дефицит наблюдался у речного макрозообентоса по метионину и цистеину, содержание которых было на порядок меньше, чем у радужной форели.

Состав АК *Gammarus lacustris* G.O. Sars 1863 был рассчитан на основе объединения литературных данных и результатов собственных исследований гаммарусов из красноярских водоемов. Из табл. 1 следует, что состав АК *G. lacustris* лучше соответствовал таковому радужной форели, чем смешанный состав речного макрозообентоса. Так, у *G. lacustris* содержание цистеина и пролина было достоверно выше, чем в пробах смешанного речного макрозообентоса ($p < 0,05$). Однако содержание метионина и цистеина в теле *G. lacustris* все же было недостаточно для полноценного питания форели.

В составе АК исследованных импортных и местных кормов было достоверно меньше метионина и лизина, по сравнению с содер-

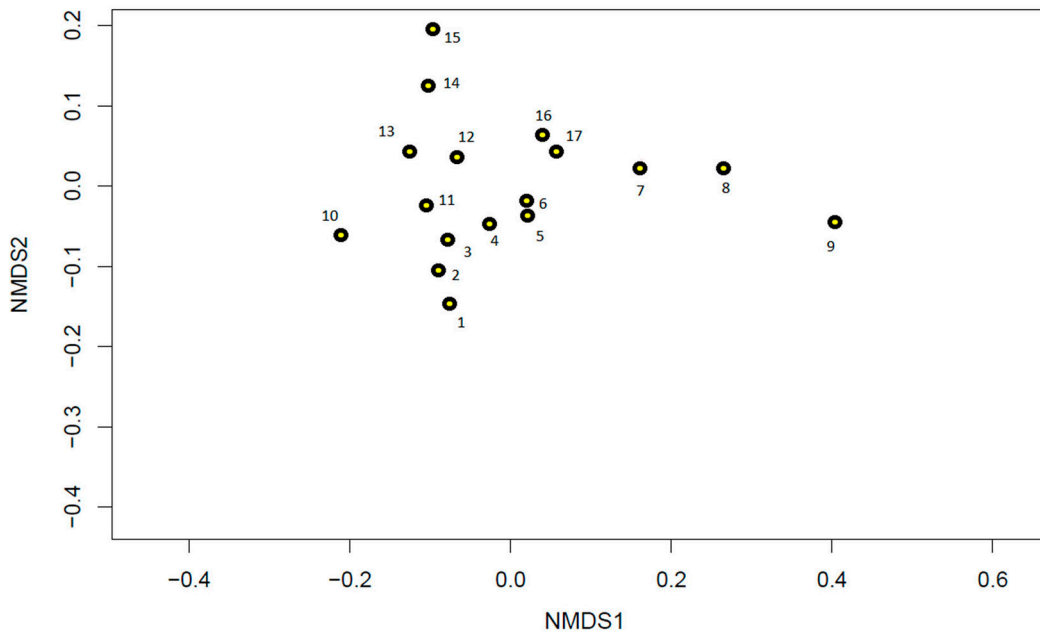


Рис. 1. Анализ состава незаменимых аминокислот в объектах питания форели методом многомерного непараметрического шкалирования (NMDS).

Цифрами отмечены номера образцов: 1 – радужная форель, 2 – рыбная мука, 3 – зоопланктон, 4 – гранулированный импортный корм, 5 – шрот рапсовый, 6 – шрот рыжиковый, 7 – барда послеспиртовая, 8 – мука пшеничная, 9 – пшеничный глютен, 10 – речной макрозообентос, 11 – *Gammarus lacustris*, 12 – дрожжи пивные, 13 – коммерческий корм местного производства, 14 – фитопланктон мезотрофного водоема, 15 – фитопланктон эвтрофного водоема, 16 – мука льняная, 17 – мука подсолнечника.

Fig. 1. Non-metric multidimensional scaling analysis of essential amino acid composition of trout food items.

The numbers refer to the following samples: 1 – rainbow trout, 2 – fishmeal, 3 – zooplankton, 4 – granulated imported feed, 5 – rapeseed meal, 6 – camelina meal, 7 – post-alcohol bard, 8 – wheat flour, 9 – wheat gluten, 10 – river macrozoobenthos, 11 – *Gammarus lacustris*, 12 – brewer's yeast, 13 – commercial feed of local production, 14 – phytoplankton of a mesotrophic water body, 15 – phytoplankton of an eutrophic water body, 16 – flaxseed flour, 17 – sunflower flour

жанием АК в теле форели (табл. 1, $p < 0,05$). В местных кормах было недостаточно также гистидина, а глутаминовая кислота была в избытке для потребности форели. Гранулированные сухие корма импортного производства содержали примерно в три раза больше метионина, чем экструдированные корма местного производства. В целом по составу незаменимых АК импортный корм был ближе к природному зоопланктону и *G. lacustris*, чем местный корм.

Радужная форель – это хищник, поэтому растительные компоненты и побочные продукты биотехнологического производства

могут быть использованы только как добавки к основному корму из рыбной муки или водным беспозвоночным. Полученные данные (табл. 2) свидетельствуют, что в местных растительных компонентах и побочных биотехнологических продуктах недостаточное суммарное содержание незаменимых АК. Во всех исследованных образцах было меньше незаменимых гистидина, лизина, метионина, но больше заменимой глутаминовой кислоты и серина, чем требуется радужной форели. По содержанию лизина ближе к потребностям форели были шроты рапсовый и рыжиковый, дрожжи пивные. Состав АК пшеничного глю-

Таблица 1. Состав аминокислот (среднее \pm SE, % от суммы) в коммерческих кормах и природных пищевых объектах питания радужной форели

Table 1. Amino acid composition (mean \pm SE, % of the sum) in industrial aquafeed and natural food items of rainbow trout

	Радужная форель* (n=4)	Коммерческий корм для аквакультуры				Природные объекты питания			
		Рыбная мука** (n=6)	Импортное производство, гранулы (n=9)	Местное производство, мука (n=3)	Gammaus lacustris *** (n=4)	Зоопланктон (n=16)****	Речной макрозообентос (Trichoptera+Gamma ridea+Chironomidae, n=7)*****		
Аргинин	6,83 \pm 0,64	6,57 \pm 0,32	5,77 \pm 0,15	7,84 \pm 1,23	6,15 \pm 0,53	6,85 \pm 0,29	7,07 \pm 0,50		
Гистидин	3,10 \pm 0,08	3,09 \pm 0,41	2,77 \pm 0,08	2,11 \pm 0,19	2,54 \pm 0,29	2,55 \pm 0,21	3,26 \pm 0,06		
Изолейцин	5,41 \pm 0,51	4,22 \pm 0,15	3,82 \pm 0,12	3,64 \pm 0,10	4,19 \pm 0,30	4,48 \pm 0,13	4,64 \pm 0,05		
Лейцин	8,59 \pm 0,59	8,40 \pm 0,60	8,94 \pm 0,22	7,21 \pm 0,08	7,41 \pm 0,49	7,70 \pm 0,31	7,60 \pm 0,10		
Лизин	8,37 \pm 0,45	7,53 \pm 0,45	5,97 \pm 0,21	6,20 \pm 0,68	7,18 \pm 0,87	8,45 \pm 0,56	7,16 \pm 0,56		
Метионин	3,54 \pm 0,37	3,09 \pm 0,19	1,03 \pm 0,18	0,29 \pm 0,29	1,56 \pm 0,43	1,91 \pm 0,19	0,34 \pm 0,13		
Фенилаланин	4,53 \pm 0,51	4,37 \pm 0,15	4,98 \pm 0,07	3,75 \pm 0,18	4,69 \pm 0,46	4,20 \pm 0,16	5,04 \pm 0,09		
Треонин	4,21 \pm 0,32	4,42 \pm 0,16	3,16 \pm 0,66	3,88 \pm 1,50	4,97 \pm 0,20	4,91 \pm 0,21	5,78 \pm 0,11		
Валин	5,56 \pm 0,48	4,99 \pm 0,21	4,98 \pm 0,15	5,07 \pm 0,21	5,36 \pm 0,19	5,59 \pm 0,15	5,65 \pm 0,08		
Σ(незаменимые АК)	50,2	46,7	41,4	40,0	44,0	46,6	46,5		
Аланин	6,34 \pm 0,18	6,96 \pm 0,30	6,32 \pm 0,18	7,82 \pm 0,81	7,36 \pm 1,44	7,31 \pm 0,39	6,62 \pm 0,17		
Аспарагин	10,1 \pm 0,25	9,40 \pm 0,64	9,13 \pm 0,16	9,64 \pm 0,65	10,3 \pm 0,96	10,1 \pm 0,23	10,9 \pm 0,17		
Цистеин	1,23 \pm 0,20	0,98 \pm 0,12	1,08 \pm 0,04	0,44 \pm 0,26	0,63 \pm 0,23	1,53 \pm 0,15	0,14 \pm 0,03		
Глутаминовая к-та	12,9 \pm 1,16	15,2 \pm 1,18	19,8 \pm 0,64	17,2 \pm 0,92	14,9 \pm 1,33	14,1 \pm 0,24	13,6 \pm 0,17		
Глицин	6,47 \pm 0,95	6,80 \pm 0,75	6,02 \pm 0,21	10,6 \pm 1,41	6,82 \pm 1,03	5,89 \pm 0,23	5,32 \pm 0,07		
Пролин	4,46 \pm 0,39	5,73 \pm 0,65	7,09 \pm 0,18	6,50 \pm 0,08	5,22 \pm 0,42	5,53 \pm 0,20	2,92 \pm 0,06		
Серин	4,33 \pm 0,09	4,73 \pm 0,56	5,70 \pm 0,22	5,30 \pm 0,06	5,38 \pm 0,26	4,61 \pm 0,18	4,93 \pm 0,07		
Тирозин	3,86 \pm 0,39	3,58 \pm 0,24	3,40 \pm 0,08	2,47 \pm 0,28	4,69 \pm 0,63	4,30 \pm 0,36	9,06 \pm 0,24		
Σ(заменимых АК)	49,8	53,3	58,6	60,0	56,0	53,4	53,5		

Источники: *(Tacon, Mettan, 2013; Rahimzade et al., 2019; Kumar et al., 2020; Lee et al., 2020); **(Bauer et al., 2012; Barnes et al., 2013; Ma et al., 2014; Riche, 2015; Xie et al., 2016; Psafakis et al., 2020); ***(Driver et al., 1974; Mathias et al., 1982; неопубликованные данные); ****(Kolmakova, Kolmakov, 2019); ***** (Kolmakova, Kolmakov et al., 2013; неопубликованные данные).

тена наименее всех исследованных образцов соответствовал таковому у форели: пролина и глутаминовой кислоты было почти в три раза больше, а треонина на порядок меньше, чем в теле радужной форели (табл. 2, рис. 1). Существенные различия в составе незаменимых АК, по сравнению с потребностью радужной форели, были обнаружены в муке пшеничной и барде спиртовой. Данные образцы имели в составе АК недостаточно не только гистидина, лизина и метионина, но и аргинина.

Фитопланктон имел наименее подходящий состав АК для полноценного питания радужной форели, по сравнению с исследованными водными беспозвоночными, растительными образцами и побочными продуктами производства (табл. 3). Во всех исследованных пробах фитопланктона, независимо от статуса водоема, было меньше незаменимых гистидина, лизина, метионина, чем требуется радужной форели ($p < 0,05$). И наоборот, содержание заменимых аланина и серина было выше, чем в теле радужной форели. В составе фитопланктона эвтрофного водоема по биомассе доминировали цианобактерии *Anabaena flos-aquae* (L.) Ralfs и *Planktothrix agardhii* (Gom.) et Kot., а мезотрофного водоема – представители диатомовых микроводорослей *Stephanodiscus hantzschii* Grun., *Synedra acus* Kutz., *Asterionella formosa* Hass. и динофитовые микроводоросли рода *Peridinium*. Следовательно, видимые из табл. 3 различия в составе АК фитопланктона эвтрофного и мезотрофного водоемов определяются спецификой цианобактерий и планктонных микроводорослей (Kolmakova, Kolmakov, 2019). Фитопланктон эвтрофного водоема содержал мало незаменимого аргинина: в три раза меньше, чем фитопланктон мезотрофного водоема, и в два раза меньше, чем радужная форель (табл. 3). В целом по составу незаменимых АК кор-

мовая ценность для радужной форели фитопланктона мезотрофного водоема выше, чем фитопланктона эвтрофного водоема (рис. 1).

Обсуждение результатов

За исключением рыбной муки, все исследованные образцы и пробы не соответствовали пищевым потребностям радужной форели по составу метионина. Необходимость содержания метионина в достаточном количестве в кормах для радужной форели многократно описана в литературе (напр., Voonyoung et al., 2013). Известно, что метионин влияет на экспрессию генов, связанных с ростом и метаболизмом у рыб (Fontagne-Dicharry et al., 2017). Поэтому кормовую ценность исследованных образцов и проб для питания радужной форели следует увеличивать за счет добавления синтетического метионина или других пищевых компонентов, имеющих высокое содержание данной АК.

Согласно полученным результатам по составу АК зоопланктон более подходит для полноценного питания радужной форели, чем макрозообентос. Недавно для субарктических водоемов также было показано, что пелагиальный зоопланктон по составу АК является более ценной пищей для лососевых рыб, чем прибрежный макрозообентос (Vesterinen et al., 2021). Очевидно, что наблюдаемые различия в составе АК макрозообентоса и зоопланктона связаны с различиями в их питании. Первый преимущественно питается фитоперифитомом, второй – фитопланктоном. В целом водные беспозвоночные из местных сибирских водоемов могут быть основной пищей радужной форели в аквакультуре, так как содержат в достаточном количестве большинство отдельных АК. Однако для полноценного питания рационы из водных беспозвоночных следует обогащать пищевыми добавками, содержащими

Таблица.2. Состав аминокислот (среднее \pm SE,% от суммы) перспективных компонентов пищи для аквакультуры радужной форели в условиях Красноярского края

Table 2. Amino acid composition (mean \pm SE,% of total) of potential food items for rainbow trout aquaculture in Krasnoyarsk region

	Радужная форель*	Мука подсолнечника	Мука пшеничная	Мука льняная	Шрот рапсовый	Шрот рыжиковый	Пшеничный глютен	Барда после-спиртовая	Дрожжи пивные
Аргинин	6,83 \pm 0,64	8,47	3,49	9,78	6,81	8,79	3,05	3,71	4,55
Гистидин	3,10 \pm 0,08	2,50	1,99	2,18	2,86	2,53	1,83	1,99	2,19
Изолейцин	5,41 \pm 0,51	3,47	2,62	3,87	4,59	3,74	3,30	3,05	4,77
Лейцин	8,59 \pm 0,59	6,95	6,59	6,34	7,98	7,26	6,86	7,89	7,89
Лизин	8,37 \pm 0,45	3,07	2,12	3,34	5,68	4,60	1,06	1,06	6,53
Метионин	3,54 \pm 0,37	0	0	0	0	1,21	0,81	0	0
Фенилаланин	4,53 \pm 0,51	4,83	4,47	4,89	4,31	4,39	5,08	4,84	4,59
Треонин	4,21 \pm 0,32	5,29	3,73	4,93	5,12	4,70	0,31	4,77	6,38
Валин	5,56 \pm 0,48	4,34	3,36	4,86	6,08	5,36	3,73	4,44	6,17
Σ(незаменимые АК)	50,2	38,9	28,4	40,2	43,4	42,6	26,0	31,8	43,1
Аланин	6,34 \pm 0,18	5,1	3,49	5,17	4,95	5,26	2,55	5,90	7,92
Аспарагин	10,1 \pm 0,25	10,6	4,73	10,6	8,70	9,34	3,16	7,89	10,7
Цистеин	1,23 \pm 0,20	1,55	1,49	1,37	1,85	1,94	2,02	1,72	0,97
Глутаминовая к-та	12,9 \pm 1,16	23,6	37,4	23,6	21,2	20,8	41,7	28,4	16,2
Глицин	6,47 \pm 0,95	6,78	4,11	6,72	5,68	5,85	3,42	5,96	5,45
Пролин	4,46 \pm 0,39	4,86	11,2	3,94	6,39	6,09	7,00	9,02	6,2
Серин	4,33 \pm 0,09	5,67	6,23	5,70	4,71	5,26	5,28	5,90	6,06
Тирозин	3,86 \pm 0,39	2,93	2,99	2,71	3,10	2,87	3,26	3,45	3,44
Σ (заменимых АК)	49,8	61,1	71,6	59,8	56,6	57,4	74,0	68,2	56,9

Источники: *(Tasop, Metian, 2013; Rahimzade et al., 2019; Kumar et al., 2020; Lee et al., 2020).

Таблица 3. Состав аминокислот (среднее \pm SE, % от суммы) радужной форели и природного фитопланктона водоемов Красноярского краяTable 3. Amino acid composition (mean \pm SE, % of the sum) of rainbow trout and natural phytoplankton in water bodies of Krasnoyarsk region

	Радужная форель* (n=4)	Фитопланктон эфтрофного водоема (n=18)**	Фитопланктон мезотрофного водоема (n=18)**
Аргинин	6,83 \pm 0,64	2,61 \pm 0,67	9,56 \pm 2,45
Гистидин	3,10 \pm 0,08	1,02 \pm 0,08	1,21 \pm 0,09
Изолейцин	5,41 \pm 0,51	4,46 \pm 0,26	3,44 \pm 0,14
Лейцин	8,59 \pm 0,59	9,39 \pm 0,51	6,35 \pm 0,29
Лизин	8,37 \pm 0,45	4,46 \pm 0,30	5,89 \pm 0,44
Метионин	3,54 \pm 0,37	0,93 \pm 0,07	0,28 \pm 0,07
Фенилаланин	4,53 \pm 0,51	3,42 \pm 0,32	3,54 \pm 0,16
Треонин	4,21 \pm 0,32	5,35 \pm 0,24	6,55 \pm 0,22
Валин	5,56 \pm 0,48	7,25 \pm 0,37	5,40 \pm 0,09
Σ(незаменимые АК)	50,2	38,9	42,2
Аланин	6,34 \pm 0,18	9,44 \pm 0,29	8,88 \pm 0,38
Аспарагин	10,1 \pm 0,25	12,1 \pm 0,38	11,3 \pm 0,36
Цистеин	1,23 \pm 0,20	н.д.	н.д.
Глутаминовая к-та	12,9 \pm 1,16	18,0 \pm 0,58	15,6 \pm 0,61
Глицин	6,47 \pm 0,95	7,72 \pm 0,53	7,02 \pm 0,23
Пролин	4,46 \pm 0,39	4,70 \pm 0,25	4,83 \pm 0,19
Серин	4,33 \pm 0,09	6,07 \pm 0,20	6,74 \pm 0,20
Тирозин	3,86 \pm 0,39	3,08 \pm 0,50	3,30 \pm 0,46
Σ(заменимых АК)	49,8	61,1	57,8

Источники: *(Tacon, Metian, 2013; Rahimzade et al., 2019; Kumar et al., 2020; Lee et al., 2020); **(Kalachova et al., 2004).

АК, лимитирующие рост и развитие товарной радужной форели.

Наряду с зоопланктоном особенно перспективный вид для кормления радужной форели – *G. lacustris*. Данный представитель отряда Gammaridea – доминант по биомассе среди макрозообентоса большинства красноярских водоемов. Под контролем и с учетом научных рекомендаций его можно вылавливать в коммерческих масштабах, достаточных для обеспечения потребностей рыбоводных хозяйств. Важно, что природный зоопланктон и *G. lacustris* могут обеспечить радужную форель достаточным количеством лизина. Содержание лизина и метионина

в пище рыб является критически важным условием при разработке эффективных кормов (Kolmakov, Kolmakova, 2020). Радужная форель очень чувствительно реагирует на недостаток данных АК в пище, снижая показатели роста и размножения (Lee et al., 2020).

В условиях аквакультуры радужная форель легко переходит на гранулированный корм. По результатам нашего анализа АК состав импортных гранулированных кормов был ближе к природным объектам питания радужной форели (рис. 1), по сравнению с кормами местного производства.

Для достижения сбалансированности питания радужной форели в исследованные

корма импортного производства следует добавлять пищевые компоненты, содержащие метионин и лизин, а в местные корма – метионин, лизин и цистеин. В целом гранулированный импортный корм лучше соответствовал потребностям в питании форели, чем местный экструдированный корм, но обладал высокой ценовой стоимостью.

В настоящее время фитопланктон и компоненты растительного происхождения из урожая и переработки зерновых или масличных растений являются наиболее распространенными среди пищевых добавок в аквакультуре рыб. Из практики известно, что животные белки в сочетании с растительными компонентами хорошо дополняют друг друга по составу АК. В результате формируются рационы с учетом пищевых потребностей рыб. Состав незаменимых АК рапсового и рыжикового шротов, по сравнению с другими изученными растительными пищевыми объектами, наиболее соответствовал потребностям радужной форели. Содержание лизина в исследованных растительных образцах и пробах фитопланктона не превышало 70 % от потребности в данной АК радужной форели, а метионина – 35 %. Информация о недостаточном содержании отдельных АК в компонентах растительного происхождения часто встречается в литературе (напр., Zhou et al., 2020). Более того, доступность АК из растительной пищи может быть пониженной, по сравнению с кормом животного происхождения. Так, в экспериментах по кормлению радужной форели растительной пищей было показано, что в организме рыб снижалось содержание изолейцина, лейцина и валина, хотя в рационе этих АК было достаточно (Kumar et al., 2020).

Из исследованных побочных продуктов биотехнологического производства наиболее

оптимальный состав незаменимых АК для радужной форели имели пивные дрожжи. Содержание лизина в пивных дрожжах было больше, чем во всех исследованных растительных образцах и фитопланктоне. Пшеничный глютен по суммарному составу незаменимых АК мало соответствует потребностям радужной форели, но все же в перспективе может использоваться как пищевая добавка из-за наличия относительно высокого содержания метионина и фенилаланина.

Заключение

На территории Красноярского края имеются перспективы для производства кормов с полноценным аминокислотным составом для радужной форели, за счет включения в рационы дешевых местных кормовых компонентов. Обеспечение дешевыми сбалансированными кормами рыбопроизводных предприятий и хозяйств позволит увеличить товарное производство форели и снабжение населения недорогой продукцией местного производства. По аминокислотному составу в качестве основного корма для радужной форели могут быть использованы организмы зоопланктона и *G. lacustris*. В качестве пищевых добавок можно применять организмы макрозообентоса р.Енисей, фитопланктон из местных водоемов, продукты переработки сельскохозяйственного и биотехнологического производства: муку подсолнечника, льна и пшеницы, рапсовый и рыжиковый шроты, пшеничный глютен, послеспиртовую барду, пивные дрожжи. Учитывая важность метионина для роста и развития радужной форели, следует продолжить поиск потенциальных природных пищевых объектов, богатых метионином.

Список литературы / References

Артамонова В. С., Янковская В. А., Голод В. М., Махров А. А. (2016) Генетическая дифференциация пород радужной форели (*Parasalmo mykiss*), разводимых в Российской Федерации. *Труды Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН*, 73(76): 25–45 [Artamonova V. S., Yankovskaya V. A., Golod V. M., Makhrov A. A. (2016) Genetic differentiation of rainbow trout (*Parasalmo mykiss*) strains bred in the Russian federation. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS* [Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod im. I. D. Papanina RAN], 73(76): 25–45 (in Russian)]

Зелинский Ю. П., Махров А. А. (2001) Хромосомная изменчивость, реорганизации генома в филогенезе и систематические отношения благородных лососей *Salmo* и *Parasalmo* (Salmonidae). *Вопросы ихтиологии*, 41(2): 184–191 [Zelinsky Yu. P., Makhrov A. A. (2001) Chromosomal variability, genome reorganization in phylogeny, and the systematics of *Salmo* and *Parasalmo* species (Salmonidae). *Journal of Ichthyology*, 41(3): 209–216]

Кононова С. В., Муранова Т. А., Зинченко Д. В., Белова Н. А., Мирошников А. И. (2016) Биотехнологические подходы при использовании белков рапса и сои в кормах аквакультуры лососевых рыб. *Биотехнология*, 32(5): 57–68 [Kononova S. V., Muranova T. A., Zinchenko D. V., Belova N. A., Miroshnikov A. I. (2016) Biotechnological approaches when using protein rapeseed and soybeans in feed for salmonid aquaculture. *Biotechnology* [Biotekhnologiya], 32(5): 57–68 (in Russian)]

Barnes M. E., Brown M. L., Rosentrater K. A., Sewell J. R. (2013) Preliminary evaluation of rainbow trout diets containing PepSoyGen, a fermented soybean meal product, and additional amino acids. *The Open Fish Science Journal*, 6: 19–27

Bauer W., Prentice-Hernandez C., Tesser M. B., Wasielesky W., Poersch L. H. S. (2012) Substitution of fishmeal with microbial floc meal and soy protein concentrate in diets for the pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 342–343(1): 112–116

Boonyoung S., Haga Y., Satoh S. (2013) Preliminary study on effects of methionine hydroxy analog and taurine supplementation in a soy protein concentrate-based diet on the biological performance and amino acid composition of rainbow trout [*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum)]. *Aquaculture Research*, 44(9): 1339–1347

Driver E. A., Sugden L. G., Kovach R. J. (1974) Calorific, chemical and physical values of potential duck foods. *Freshwater Biology*, 4(3): 281–292

Fontagne-Dicharry S., Alami-Durante H., Aragao C., Kayshik S. J., Geurden I. (2017) Parental and early-feeding effects of dietary methionine in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquaculture*, 469: 16–27

Kalachova G. S., Kolmakova A. A., Gladyshev M. I., Kravchuk E. S., Ivanova E. A. (2004) Seasonal dynamics of amino acids in two small Siberian reservoirs dominated by prokaryotic and eukaryotic phytoplankton. *Aquatic Ecology*, 38(1): 3–15

Kasumyan A. O., Tinkova T. V. (2013) Taste attractiveness of different hydrobionts for roach *Rutilus rutilus*, bitterling *Rhodeus sericeus amarus*, and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Journal of Ichthyology*, 53(7): 499–508

Kolmakov V. I., Kolmakova A. A. (2020) Amino acids in prospective feeds for fish aquaculture: A review of experimental data. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 13(4): 424–442 (in Russian)

Kolmakova A. A., Gladyshev M. I., Kalachova G. S., Kravchuk E. S., Ivanova E. A., Sushchik N. N. (2013) Amino acid composition of epilithic biofilm and benthic animals in a large Siberian river. *Freshwater Biology*, 58(10): 2180–2195

Kolmakova A. A., Kolmakov V. I. (2019) Amino acid composition of green microalgae and diatoms, cyanobacteria, and zooplankton (review). *Inland Water Biology*, 12(4): 452–461

Kumar V., Lee S., Cleveland B.M., Romano N., Lalgudi R.S., Benito M.R., McGraw B., Hardy R.W. (2020) Comparative evaluation of processed soybean meal (EnzoMeal™) vs. regular soybean meal as a fishmeal replacement in diets of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): Effects on growth performance and growth-related genes. *Aquaculture*, 516: 734652

Lee S., Small B.C., Patro B., Overturf K., Hardy R.W. (2020) The dietary lysine requirement for optimum protein retention differs with rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum) strain. *Aquaculture*, 514: 734483

Li P., Mai K., Trushenski J., Wu G. (2009) New developments in fish amino acid nutrition: towards functional and environmentally oriented aquafeeds. *Amino Acids*, 37(1): 43–53

Ma X., Wang F., Han H., Wang Y., Lin Y. (2014) Replacement of dietary fish meal with poultry by-product meal and soybean meal for golden pompano, *Trachinotus ovatus*, reared in net pens. *Journal of the World Aquaculture Society*, 45(6): 662–671

Mambrini M., Kaushik S.J. (1995) Indispensable amino acid requirements of fish: correspondence between quantitative data and amino acid profiles of tissue proteins. *Journal of Applied Ichthyology*, 11(3–4): 240–247

Mastoraki M., Molla Ferrandiz P., Vardali S.C., Kontodimas D.C., Kotzamanis Y.P., Gasco L., Chatzifotis S., Antonopoulou E. (2020) A comparative study on the effect of fish meal substitution with three different insect meals on growth, body composition and metabolism of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.). *Aquaculture*, 528: 735511

Mathias J.A., Martin J., Yurkowski M., Lark J.G.I., Papst M., Tabachek J.L. (1982) Harvest and nutritional quality of *Gammarus lacustris* for trout culture. *Transactions of the American Fisheries Society*, 111(1): 83–89

Moore S., Stein W.H. (1954) A modified ninhydrin reagent for photometric determination of amino acids and related compounds. *Journal of Biological Chemistry*, 211(2): 907–913

Pavlov S.D., Semenova A.V., Melnikova M.N. (2019) Differentiation of the Kamchatka rainbow trout *Parasalmo* (*Oncorhynchus mykiss*) populations by microsatellite DNA loci. *Biology Bulletin*, 46(2): 144–153

Psofakis P., Karapanagiotidis I.T., Malandrakis E.E., Golomazou E., Exadactylos A., Mente E. (2020) Effect of fishmeal replacement by hydrolyzed feather meal on growth performance, proximate composition, digestive enzyme activity, haematological parameters and growth-related gene expression of gilthead seabream (*Sparus aurata*). *Aquaculture*, 521: 735006

R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>

Rahimzade E., Bahri A.H., Moini S., Zare D.N. (2019) Influence of vacuum packaging and frozen storage time on fatty acids, amino acids and $\omega-3/\omega-6$ ratio of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 18(4): 1083–1092

Riche M. (2015) Nitrogen utilization from diets with refined and blended poultry by-products as partial fish meal replacements in diets for low-salinity cultured Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. *Aquaculture*, 435: 458–466

Tacon A. G.J., Metian M. (2013) Fish matters: importance of aquatic foods in human and global food supply. *Reviews in Fisheries Science*, 21(1): 22–38

Vesterinen J., Keva O., Kahilainen K. K., Strandberg U., Hiltunen M., Kankaala P., Taipale S. J. (2021) Nutritional quality of littoral macroinvertebrates and pelagic zooplankton in subarctic lakes. *Limnology and Oceanography*, 66(S 1): 81–97

Xie S.-W., Liu Y.-J., Zeng S., Niu J., Tian L.-X. (2016) Partial replacement of fish-meal by soy protein concentrate and soybean meal based protein blend for juvenile Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 464: 296–302

Yang L., Li H., Lu Q., Zhou W. (2021) Emerging trends of culturing microalgae for fish-rearing environment protection. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 96(1): 31–37

Zhou Z., Yao W., Ye B., Wu X., Li X., Dong Y. (2020) Effects of replacing fishmeal protein with poultry by-product meal protein and soybean meal protein on growth, feed intake, feed utilization, gut and liver histology of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) juveniles. *Aquaculture*, 516: 734503