



Аквакультура

Опыт замены рыбьего жира растительными маслами в комбикормах для радужной форели

С.В. Биндюков¹, И.В. Бурлаченко¹, Ю.А. Баскакова¹, Р.В. Артемов¹, М.В. Арнаутов¹,
Ю.А. Новоселова², В.В. Гершунская¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), Окружной проезд, 19, Москва, 105187

² Филиал по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ «ВНИРО» («ВНИИПРХ»), п. Рыбное, 40А, Дмитровский г. о., Московская обл., 141821

E-mail: protein@vniro.ru

Целью работы являлось изучение влияния замены в комбикормах рыбьего жира растительными маслами на продукционные, физиологические показатели, а также химический и жирнокислотный состав тканей радужной форели. Для оценки влияния липидного состава корма на молодь форели определяли показатели ее темпа роста, выживаемости, кормовых затрат, химического и жирнокислотного состава мышечной ткани. Питательную ценность кормов оценивали **методами** анализа содержания основных питательных веществ. Для определения жирнокислотного состава общих липидов кормов и мышечной ткани форели метиловые эфиры жирных кислот анализировали на хроматографе «Кристалл 5000.2».

Новизна исследования связана с моделированием оптимального соотношения рыбьего жира, рапсового и соевого масел в рецептурах кормов.

В результате исследований установлено, что самые высокие ростовые показатели и выживаемость при более низких затратах комбикорма выявлены у рыб, выращиваемых на кормах без замены рыбьего жира и кормах с использованием смеси рыбьего жира, рапсового и соевого масел в соотношении 4:6:5. Замена в рецептах кормов рыбьего жира на растительные масла не оказала отрицательного влияния на химический состав мышечной ткани рыбы. Благодаря процессам элонгации и десатурации, протекающим в тканях радужной форели, включение в состав комбикормов рапсового и соевого масел не приводило к снижению количества эйкозапентаеновой и докозагексаеновой жирных кислот.

Практическая значимость работы заключается в получении новых рецептов комбикормов для ценных видов рыб, обеспечивающих возможности эффективного выращивания радужной форели с заданными качественными характеристиками.

Ключевые слова: радужная форель *Oncorhynchus mykiss*, питание рыб, комбикорм, замена рыбьего жира, жирнокислотный состав, омега-3, ростовые показатели.

Fish oil replacement with vegetable oils in compound feeds for rainbow trout

Sergey V. Bindukov¹, Irina V. Burlachenko¹, Yuliya A. Baskakova¹, Roman V. Artemov¹,
Maksim A. Arnautov¹, Yuliya A. Novoselova², Valeriya V. Gershunskaya¹

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography («VNIRO»), Okruzhnoy proezd, 19, Moscow, 105187, Russia

² Freshwater fisheries branch of «VNIRO» («VNIIPRH»), 40A, v. Rybnoe, Dmitrov c. d., Moscow reg., 141821, Russia

The **aim** of the work was to study the effect of compound feeds with full or partial replacement of fish oil with vegetable oils on the composition of tissues and growth performance of rainbow trout.

Method of chemical analyses was used for the estimation of nutritional value of the feed. To determine the fatty acid composition of the total lipids of feed and muscle tissue of trout, methyl esters of fatty acids were analyzed on a Crystal 5000.2 chromatograph. To assess the effect of compound feeds on fish, a number of fish-breeding and biological indicators were determined.

The novelty of the study is associated with modeling the optimal ratio of fish oil, rapeseed and soybean oils in fish diets.

As a result of the research, it was found that the highest growth rates and survival at lower feed costs were found in fish grown on diet without replacing fish oil and diet with a mixture of fish oil, rapeseed and soybean oils in a ratio of 4:6:5. Replacing fish oil with vegetable oils in feed recipes did not adversely affect the chemical composition of fish muscle tissue. Due to the elongation and desaturation processes occurring in the tissues of rainbow trout, the inclusion of rapeseed and soybean oils in the compound feed did not lead to a decrease in the amount of eicosapentaenoic and docosahexaenoic fatty acids.

The practical significance of the work lies in obtaining new diets for compound feeds for valuable fish species, providing opportunities for effective cultivation of rainbow trout with specified quality characteristics.

Keywords: rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, fish nutrition, feed, fish oil replacement, fatty acid composition, omega-3, growth performance.

ВВЕДЕНИЕ

Лососеводство является одним из наиболее перспективных направлений товарного рыбоводства. С 2013 по 2020 гг. объёмы аквакультуры лососевых в Российской Федерации выросли почти в три раза и достигли 116,2 тысячи т. Производство форели разных видов по итогам 9 месяцев 2021 г. составило около 100 тысяч т.¹ Радужная форель *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum, 1792) – это широко распространённый вид семейства лососевых, который относится к традиционным объектам аквакультуры. В настоящее время её активно выращивают в условиях садковых форелеводческих хозяйств, в бассейнах закрытого типа и установках замкнутого водообеспечения [Новоженин, 2010].

Интенсивный рост товарной аквакультуры в мире во многом связан с применением экструдированных комбикормов. В качестве основной липидной составляющей в кормах для лососевых рыб преимущественно использовали рыбий жир в связи с его высокой переваримостью и наличием незаменимых полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК). Длинноцепочечные ПНЖК семейства омега-3, такие как эйкозапентаеновая (20:5n-3, ЭПК) и докозагексаеновая (22:6n-3, ДГК), являются важнейшими элементами питания холодолюбивых рыб, т. к. обеспечивают их адаптацию к условиям низкой температуры [Sargent et al., 1999; Tocher, 2003; Trushenski et al., 2012].

В последнее время всё более остро встаёт вопрос о сокращении использования рыбьего жира в качестве компонента комбикормов для объектов аквакультуры. Рост производства продукции рыбоводства и ракообразных и, соответственно, комбикормов для них приводит к тому, что аквакультура оказывается не производителем, а потребителем ЭПК и ДГК [Гладышев, 2020]. Согласно исследованиям Турчини на производство 1 г ПНЖК в филе лососевых рыб расходуется 5 г кормовых ПНЖК [Turchini et al., 2011]. Кроме того, рыбий жир на сегодняшний день весьма дорогой и ограниченный в производстве ресурс. Поэтому поиск альтернативных источников липидов для комбикормов является актуальной задачей и рассматривается как одна из составляющих устойчивого развития ООН [Tacon, Metian, 2008].

В качестве возможных источников липидов для комбикормов рассматриваются различные растительные масла (подсолнечное, льняное, соевое, рапсовое, оливковое, пальмовое, хлопковое, горчичное), содержащие большую долю жирных кислот семейства омега-3 и омега-6 [Sales, Glencross, 2011; Nasopoulou,

Zabetakis, 2012; Turchini et al., 2018; Lima et al., 2019]. Некоторые из них особенно богаты альфа-линоленовой кислотой (18:3n-3), которая может быть использована рыбами для собственного синтеза ЭПК и ДГК с помощью ферментов элонгаз и десатураз [Turchini et al., 2009]. Наличие этих ферментов в большей степени присуще рыбам низкого трофического уровня, в меньшей – хищным видам рыб.

Поэтому зачастую замена рыбьего жира альтернативными источниками липидов снижает содержание ЭПК и ДГК в корме и выращиваемой рыбе. В этой связи для различных видов рыб актуальным является подбор состава липидных компонентов корма, который в необходимой степени мог бы обеспечить процессы элонгации жирных кислот в ходе метаболизма ЭПК и ДГК [Tocher et al., 2019], на фоне сохранения высокой скорости роста и выживаемости.

Целью настоящей работы было изучение влияния замены в комбикормах рыбьего жира растительными маслами на продукционные, физиологические показатели, а также химический и жирнокислотный состав тканей радужной форели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема эксперимента представлена в табл. 1.

Экспериментальные комбикорма, в составе которых рыбий жир был полностью или частично заменён на растительные масла в определённом соотношении, изготавливали в Филиале по пресноводному рыбному хозяйству ФГБНУ «ВНИРО» («ВНИИПРХ») на опытно-производственной линии Amandus Kahl (Германия) методом экструдирования с использованием матрицы с отверстиями диаметром 4,5 мм. В качестве контроля использовали коммерческий экструдированный корм отечественного производства для форели, в состав которого, согласно маркировке, входило растительное масло и рыбий жир.

При исследовании химического состава комбикормов и мышечной ткани рыб в образцах определяли содержание влаги путём высушивания навески до постоянной массы в лабораторной электропечи SNOL 58/350 при температуре 103±1 °С. Содержание сырого протеина определяли по методу Кьельдаля² с помощью автоматического анализатора Kjelttec™-8400, содержание сырого жира – по методу Сокслета³ на автоматическом экстракторе VELP Scientifica SER

² ГОСТ 32044.1–2012 (ISO 5983–1:2005). 2014. Корма, комбикорма, комбикормовое сырьё. Определение массовой доли азота и вычисление массовой доли сырого протеина. Часть 1. Метод Кьельдаля. Введ. 01.07.2014. М.: Стандартинформ. 15 с.

³ ГОСТ 32905–2014 (ISO 6492:1999). 2015. Корма, комбикорма, комбикормовое сырьё. Метод определения содержания сырого жира (с Поправкой). Введ. 01.01.2016. М.: Стандартинформ. 16 с.

¹ <http://aquacultura.org/news/otechestvennyy-losos-zakryl-importnyu-nishu/>

Таблица 1. Схема испытаний комбикормов с заменой рыбьего жира растительными маслами на радужной форели
Table 1. The scheme of rainbow trout feed experiment on diets with the replacement of fish oil with vegetable oils

| Шифр комбикормов | Основной компонентный состав комбикормов | Содержание, % | | |
|------------------|---|---|----------------|--------------|
| | | Рыбий жир | Рапсовое масло | Соевое масло |
| КРФР 15/0/0 | Рыбная мука, пшеница, мясная мука, соевый шрот, соевый концентрат, пшеничный глютен, премикс | 15 | – | – |
| КРФР 8/4/3 | | 8 | 4 | 3 |
| КРФР 4/6/5 | | 4 | 6 | 5 |
| КРФР 0/7/8 | | 0 | 7 | 8 |
| Контроль | Рыбная мука, пшеница, концентрат белка подсолнечника, соевый концентрат, кукурузный глютен, гемоглобин, премикс | Рыбий жир, растительное масло, соотношение неизвестно | | |

148/6 при использовании диэтилового эфира в качестве растворителя. Количество сырой золы находили путём сжигания образцов в муфельной печи Yamato FM37 при температуре 550 ± 2 °С до постоянной массы и равномерного цвета. Содержание клетчатки в образцах устанавливали по методу Геннеберга-Штомана.⁴ Сумму безазотистых экстрактивных веществ (БЭВ) вычисляли расчётным путём.

Состав жирных кислот общих липидов комбикормов и мышечной ткани форели анализировали в виде метиловых эфиров на газовом хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором на капиллярной колонке CR-FAME 100 \times 0,25 мм \times 0,2 мкм («Хроматэк»), газ носитель – водород. В качестве стандарта была использована смесь метиловых эфиров Supelco 37 component FAME MIX (каталожный номер CRM47885). Обработку результатов анализа производили с использованием программного обеспечения Хроматек Аналитик методом внутренней нормализации.

Рыбоводно-биологические испытания комбикормов проводили в условиях экспериментального рыбоводного комплекса ВНИИПРХ на молоди радужной форели. Средняя масса рыб в начале опыта составляла от 190 до 209 г.

Форель содержали в проточных прямоугольных бассейнах объёмом 1,3 м³ с начальной плотностью посадки 16 кг/м³ (110 штук/бассейн). Расход воды составлял 17,1 л/мин при полном водообмене 76 минут. Эксперимент продолжался в течение 58 суток. Суточный рацион кормления составлял 1,5% от биомассы; кормили рыб вручную 5 раз в светлое время суток. Отход рыбы учитывали ежедневно. Чистку рыбоводных ёмкостей проводили по мере загрязнения.

⁴ ГОСТ 31675–2012. 2014. Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации. Введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ. 22 с.

Гидрохимические параметры среды выращивания рыб (температуру, содержание кислорода, pH) фиксировали 2 раза в сутки. Температуру определяли с помощью водного термометра, в процессе рыбоводных испытаний она постепенно повышалась от 10,5 до 16,4 °С. Содержание растворённого в воде кислорода, регистрировавшееся с помощью термооксиметра OxyGuard Handy Polaris, за период выращивания составило 6,9–10,1 мг О₂/л. Значения pH определяли pH-метром Hanna, значения варьировали в пределах 7,7–8,3.

Оценку темпа роста проводили на основании результатов контрольных обловов и взвешивания по 25 экз. из каждого бассейна. В ходе исследований применяли стандартные методики обработки первичного материала [Правдин, 1966]. Абсолютный прирост вычисляли по разности между начальной и конечной массой рыб. Относительный прирост рассчитывали по формуле:

$$B = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100\%,$$

где B – относительный прирост, %; M_0 , M_t – средняя масса рыб в начале и конце эксперимента, г.

Среднесуточный прирост рассчитывали по формуле:

$$C_w = \frac{2 \cdot (M_t - M_0)}{(M_t + M_0) \cdot t} \times 100\%,$$

где C_w – среднесуточный прирост, %; M_0 , M_t – средняя масса рыб в начале и конце эксперимента, г; t – количество суток.

Коэффициент упитанности определяли по формуле Т. Фультона:

$$K_u = \frac{M}{L^3} \times 100\%,$$

где M – масса рыбы, г; L – длина рыбы по Смитту.

Индекс печени определяли по Шварцу в процентах от массы рыбы.

Выживаемость выражали в процентах от общего количества наблюдаемых рыб. Кормовые затраты

находили путём отношения количества затраченного корма на прирост молоди с учётом её отхода, за весь период выращивания [Щербина, Гамыгин, 2006].

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью однофакторного дисперсионного анализа методом ANOVA. Результаты представляли в виде средних значений и их ошибок ($x \pm m_x$). Уровень значимости составлял не менее 95% ($p < 0,05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рецепты комбикормов с различным соотношением рыбьего жира, рапсового и соевого масла (табл. 1) были смоделированы на основании данных о питательной ценности кормовых компонентов и с учетом потребности форели в основных нутриентах [Nutrient requirements..., 2011]. Как видно из табл. 1 в состав экспериментальных и контрольного корма входили, в основном, сходные компоненты.

Питательную ценность кормов оценивали путём совокупного анализа содержания основных питательных веществ и расчёта валовой энергии (табл. 2).

Согласно результатам исследований по химическому составу опытные комбикорма не различались между собой, при этом по содержанию белка, жира и БЭВ достоверно отличались от контрольного образца ($p < 0,05$). Количество жира во всех опытных образцах комбикормов составляло в среднем около 17%, что соответствовало расчётным показателям, заданным при моделировании рецептур. В контрольном образце корма содержание липидов было довольно высоким – 23,51%. Все образцы комбикормов были высокоэнергетическими с содержанием валовой энергии от 21,1 до 23,2 МДж/кг.

Для оценки биологической ценности общих липидов контрольного и экспериментальных комбикормов исследован их жирнокислотный состав, данные представлены на рис. 1.

Таблица 2. Химический состав и валовая энергия комбикормов для радужной форели с заменой рыбьего жира растительными маслами

Table 2. Chemical composition and gross energy of rainbow trout diets with replacement of fish oil with vegetable oils

| Шифр комбикормов | Содержание, % | | | | | | Валовая энергия, МДж/кг |
|------------------|---------------|---------------|------------|------------|------------|-----------|-------------------------|
| | влага | сырой протеин | сырой жир | сырая зола | БЭВ | клетчатка | |
| КРФР 15/0/0 | 5,41±0,20 | 46,22±0,22 | 16,41±0,15 | 8,03±0,22 | 21,53±0,41 | 2,53±0,11 | 21,3 |
| КРФР 8/4/3 | 6,52±0,14 | 45,91±0,25 | 17,13±0,21 | 8,11±0,14 | 20,05±0,36 | 2,50±0,10 | 21,3 |
| КРФР 4/6/5 | 6,54±0,21 | 46,13±0,28 | 16,52±0,20 | 8,13±0,17 | 20,51±0,35 | 2,54±0,09 | 21,1 |
| КРФР 0/7/8 | 6,23±0,13 | 46,14±0,30 | 17,11±0,18 | 8,04±0,21 | 20,14±0,41 | 2,53±0,07 | 21,3 |
| Контроль | 5,71±0,16 | 47,04±0,32 | 23,51±0,32 | 6,12±0,22 | 15,13±0,35 | 2,50±0,10 | 23,2 |

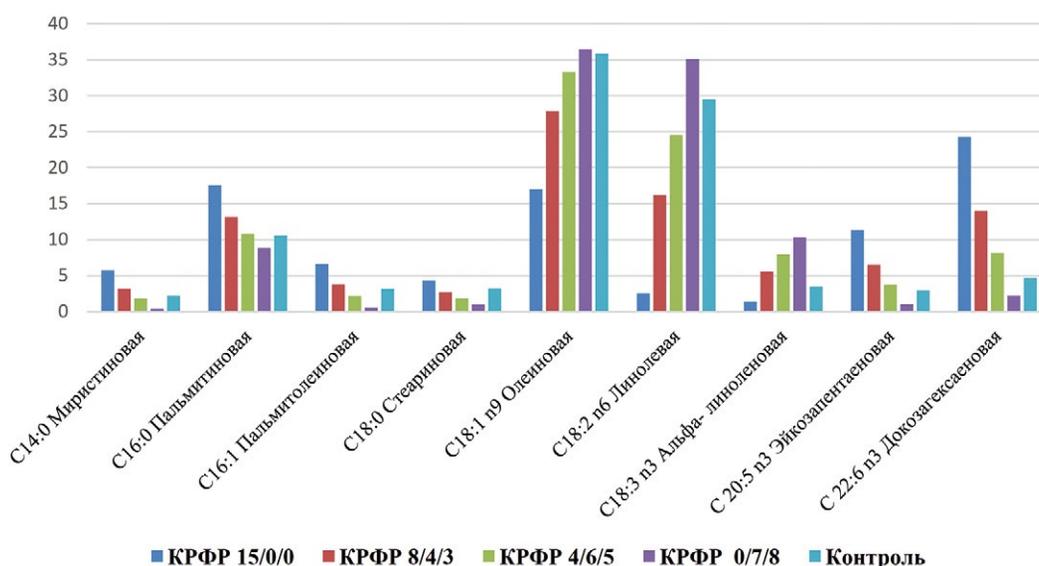


Рис. 1. Содержание жирных кислот в липидах комбикормов с заменой рыбьего жира растительными маслами, % от суммы
Fig. 1. The fatty acids content in the lipids of diets with the replacement of fish oil with vegetable oils, %

Результаты анализа показали существенную разницу в содержании жирных кислот.

Содержание насыщенных жирных кислот, служащих основным источником энергии в метаболизме рыб, было минимальным в экспериментальном комбикорме без рыбьего жира (КРФР 0/7/8) и практически в 2 раза отличалось в меньшую сторону от их количества в корме, содержащем только рыбий жир (КРФР 15/0/0).

Количество мононенасыщенной олеиновой кислоты возрастало по мере увеличения доли растительных масел в составе корма: от 17% в КРФР 15/0/0, включавшем только рыбий жир до 35,8–36,5% от общей суммы жирных кислот в контроле и комбикорме с рапсовым и соевым маслом (КРФР 0/7/8).

Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) исследованных комбикормов представлены семействами омега-3 и омега-6. Наиболее выраженную динамику наблюдали в содержании линолевой кислоты, относящейся к семейству омега-6, основным источником которой служило соевое масло. В корме без растительных масел (КРФР 15/0/0) её определяли на уровне 2,5%. При повышении содержания растительных масел происходило увеличение доли линолевой кислоты с 16,2% для КРФР 8/4/3 до 24,6% для КРФР 4/6/5, 29,5% для контроля и 35,1% для КРФР 0/7/8.

Количество незаменимой для рыб альфа-линоленовой кислоты, относящейся к семейству оме-

га-3, составляло 1,4% в корме КРФР 15/0/0; 5,6% – в КРФР 8/4/3; 7,9 и 10,3% в КРФР 4/6/5 и КРФР 0/7/8, соответственно. В контрольном корме её содержание не превышало 3,5%. Важно отметить, что, согласно литературным данным, радужная форель относится к тем немногим видам рыб, способным синтезировать ЭПК и ДГК из растительной альфа-линоленовой кислоты [Tocher, 2003; Turchini et al., 2009; Остроумова, 2012].

По содержанию длинноцепочечных ПНЖК семейства омега-3, а именно ЭПК и ДГК, опытные и контрольный корма также имели существенные различия. Наиболее низкий уровень этих кислот был в контрольном корме (2,97 и 4,66%) и КРФР 0/7/8 (0,99 и 2,22%, соответственно). В последнем содержание ЭПК и ДГК было на порядок меньше чем в корме без растительных масел КРФР 15/0/0, содержащем 11,28% ЭПК и 24,29% ДГК. В комбикормах КРФР 8/4/3 и КРФР 4/6/5 количество ЭПК и ДГК было также весьма высоким и превышало рекомендуемые в литературе минимальные уровни для удовлетворения потребностей форели в этих жирных кислотах, составляющие 0,5–1% к рациону [Остроумова, 2012; Barry, Trushenski, 2019].

Таким образом, согласно проведённым исследованиям в опытных образцах кормов с увеличением доли растительных масел возрастало содержание олеиновой, линолевой и альфа-линоленовой кислот

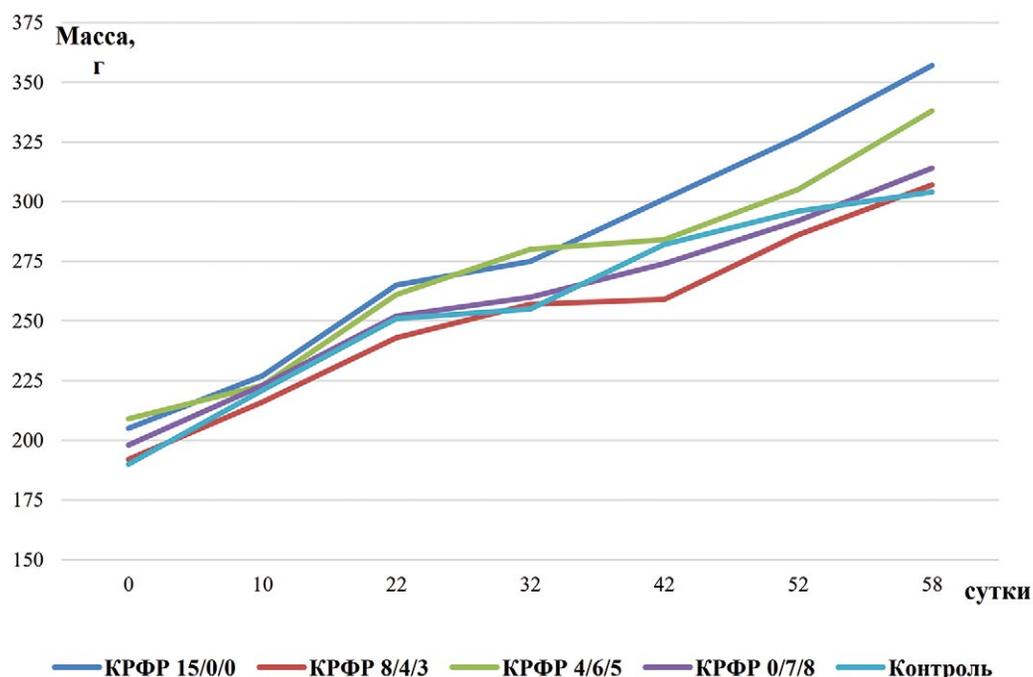


Рис. 2. Изменение массы тела радужной форели, выращиваемой на комбикормах с заменой рыбьего жира растительными маслами, г

Fig. 2. Body weight dynamic of rainbow trout on diets with the replacement of fish oil with vegetable oils

и снижалось содержание длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот (ЭПК и ДГК).

В процессе проведения испытаний комбикормов с различным уровнем замены рыбьего жира изучены динамика изменения массы и рыбоводно-биологические показатели радужной форели.

Динамика изменений массы молоди радужной форели в период выращивания представлена на рис. 2. Показатели живой массы форели возрастали в опытных и контрольной группах на протяжении всего периода исследований. Наибольшие ростовые показатели отмечены в группах рыб, получавших корма КРФР 15/0/0 и КРФР 4/6/5.

Результаты рыбоводных испытаний комбикормов с различным уровнем замены рыбьего жира представлены в табл. 3.

Анализ результатов опыта показал, что замена в рационе молоди форели рыбьего жира растительными маслами в различных соотношениях оказала определённое влияние на комплекс рыбоводно-биологических показателей. Лучший темп роста и соответственно прироста отмечен в группе 1 (корм КРФР 15/0/0). Средняя конечная масса в этом варианте была наибольшей – 357,10 г, а абсолютный прирост 152,1 г, что в 1,3 выше, чем в контроле. Несколько хуже росла рыба из группы 3 (корм КРФР 4/6/5), где абсолютный прирост составил 129,1 г, средняя конечная масса – 338,1 г. В остальных бассейнах приросты были близкими – от 114,1 до 116,1 г. Относительный прирост также был максимальным у рыб, получавших корма без добавления растительных масел. В остальных группах, выращенных на рационах с различным соотношением растительных масел, этот показатель составлял от 58,6 до 61,7%.

Среднесуточная скорость роста во всех вариантах опыта и контроле была невысокой и колебалась в пределах 0,8–0,9%. Это можно объяснить неоптимальными температурным и кислородным режимами проведения опыта.

Наибольшая выживаемость отмечена в группах 1, 3 и контроле, где она колебалась от 92,7 до 96,4%. В группах 2 и 4 выживаемость составила 86,4 и 87,3%, соответственно.

Анализ морфофизиологических показателей показал, что коэффициенты упитанности молоди форели в экспериментальных и контрольной группах были стабильными, характерными для рыб данной возрастной группы [Молчанова, Хрусталева, 2017] и не зависели от использованного корма. Внесение растительных масел не вызывало нарушений жирового обмена в организме рыб, что подтверждено данными по величинам индекса печени, которые были в пределах нормы.

Наименьшие кормовые затраты получены при использовании корма, содержащего в качестве липидов только рыбий жир – 1,2 ед. В третьей группе и контроле этот показатель составил 1,4 ед. Самая низкая эффективность кормления отмечена во второй опытной группе на корме КРФР 8/4/3.

Таким образом, согласно данным рыбоводно-биологических испытаний замена рыбьего жира растительными маслами в составе кормов для форели не оказывала отрицательного влияния на скорость роста и физиологическое состояние рыб. Лучшие рыбоводные результаты получены при выращивании радужной форели на кормах без замены рыбьего жира (КРФР 15/0/0). Однако, согласно материалам других исследователей, замена рыбьего жира растительными

Таблица 3. Рыбоводно-биологические показатели радужной форели при выращивании на комбикормах с заменой рыбьего жира растительными маслами

Table 3. Fish-breeding and biological indicators of rainbow trout on diets with the replacement of fish oil with vegetable oils

| Показатель | Шифр комбикормов | | | | |
|--|------------------|------------|------------|------------|------------|
| | КРФР 15/0/0 | КРФР 8/4/3 | КРФР 4/6/5 | КРФР 0/7/8 | Контроль |
| Средняя начальная масса, г | 205,0±13,7 | 192,1±14,1 | 209,1±12,9 | 198,5±13,0 | 190,1±14,5 |
| Средняя конечная масса, г | 357,1±28,6 | 307,3±19,0 | 338,1±27,2 | 314,2±23,4 | 304,2±19,2 |
| Абсолютный прирост, г | 152,1 | 115,0 | 129,1 | 116,1 | 114,1 |
| Относительный прирост, В, % | 74,2 | 59,9 | 61,7 | 58,6 | 60,0 |
| Среднесуточный прирост, С _с , % | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| Выживаемость, % | 96,4 | 86,4 | 92,7 | 87,3 | 93,6 |
| Коэффициент упитанности, К _у | 2,03±0,06 | 2,04±0,04 | 2,02±0,08 | 2,12±0,08 | 2,02±0,07 |
| Индекс печени | 1,48±0,09 | 1,40±0,09 | 1,45±0,08 | 1,42±0,05 | 1,54±0,06 |
| Кормовые затраты | 1,2 | 1,9 | 1,4 | 1,7 | 1,4 |

маслами не сказывается на темпах роста радужной форели [Yildiz et al., 2018; Turchini et al., 2018; Lima et al., 2019; Gesto et al., 2021]. Возможно, на результат эксперимента могли повлиять условия окружающей среды: в конце эксперимента наблюдали некоторое снижение растворённого в воде кислорода; средняя температура воды в бассейнах составила 13,3 °С, что несколько ниже оптимальной, принятой для выращивания форели – 15 °С [Титарев, 2007].

Оценку влияния комбикормов на пищевую ценность мяса радужной форели проводили путём исследования химического состава образцов мышечной ткани, данные представлены в табл. 4.

Согласно результатам анализов содержание влаги, белка и липидов в мышечной ткани рыб опытных групп в процессе выращивания значительно не изменилось по сравнению с этими показателями в мясе форели до начала эксперимента. Следует отметить, что мясо форели, получавшей комбикорм КРФР 4/6/5, отличалось высоким уровнем белка и жира. Полная замена в комбикорме для молоди форели рыбьего жира растительными маслами (группа 4) не оказала отрицательного влияния на химический состав мышечной ткани. При этом у рыб из контрольной группы отмечено снижение содержания липидов в мышцах, несмотря на то, что уровень жира в корме был самым высоким. Это может свидетельствовать о недостаточной балансировке корма, что приводило к нарушению метаболизма и влияло на накопление питательных веществ в съедобных частях тела рыбы. В целом, полученные результаты по содержанию белка и жира коррелируют с данными, полученными отечественными учеными при выращивании сеголеток радужной форели на искусственных кормах в условиях бассейнов [Панов и др., 1991], садков [Поддубная, Котельникова, 2017], установок замкнутого водообеспечения [Соколов, Дворянинова, 2019].

Завершающим этапом исследований влияния замены рыбьего жира на растительные масла в комбикормах для молоди радужной форели явилась оценка жирнокислотного состава общих липидов мышечной ткани форели экспериментальных и контрольной групп. Полученные результаты приведены в табл. 5.

В процессе исследований установлено, что до начала эксперимента содержание олеиновой и линолевой жирных кислот в мышечной ткани рыбы было весьма высоким – 33,20 и 25,92%, соответственно, а количество длинноцепочечных ПНЖК семейства омега-3 небольшим – всего 1,75% ЭПК и 5,66% ДГК, что являлось следствием питания рыбы комбикормом, содержащим растительные масла.

В результате эксперимента в жирнокислотном профиле мышц радужной форели произошли определённые изменения. У форели, выращенной на корме с рыбьим жиром содержание омега-6 кислот существенно уменьшилось, количество ПНЖК семейства омега-3 выросло, а сумма ЭПК и ДГК характеризовалась максимальным значением (10,25%) и стала в 1,4 раза больше, чем до начала эксперимента.

В образцах мышечной ткани форели, получавшей корма КРФР 8/4/3 и КРФР 4/6/5 содержание олеиновой и линолевой кислот сопоставимо с их уровнем у рыб до начала опыта. Суммарный уровень ЭПК и ДГК у рыб, выращенных на указанных кормах, составил 8,40 и 7,89%, соответственно, что превышает количество длинноцепочечных ПНЖК до начала эксперимента, причём, это преимущество возникло в основном за счёт увеличения количества ДГК.

В липидах форели, получавшей опытные корма без рыбьего жира, количество линолевой и олеиновой кислот выросло до 27,11% и 34,38%, а содержание ЭПК и ДГК снизилось до 1,36 и 4,41%, соответственно. Очевидно, что корм с использованием только растительных масел отрицательно сказался на содер-

Таблица 4. Химический состав мышечной ткани радужной форели при выращивании на комбикормах с растительными маслами

Table 4. Chemical composition of rainbow trout muscle tissue on diets with vegetable oils

| Группа рыб | Шифр комбикормов | Содержание, % | | | |
|------------|------------------|---------------|-----------|-----------|------------|
| | | белок | липиды | зола | влага |
| | До эксперимента | 19,03±0,38 | 7,39±0,23 | 1,09±0,09 | 72,92±0,74 |
| 1 | КРФР 15/0/0 | 18,81±0,32 | 7,15±0,19 | 1,05±0,07 | 73,34±0,80 |
| 2 | КРФР 8/4/3 | 19,59±0,41 | 7,81±0,20 | 0,97±0,11 | 71,51±0,86 |
| 3 | КРФР 4/6/5 | 20,19±0,29 | 8,01±0,26 | 0,95±0,08 | 71,15±0,75 |
| 4 | КРФР 0/7/8 | 18,66±0,35 | 7,31±0,21 | 1,11±0,12 | 72,62±0,91 |
| | Контроль | 19,28±0,40 | 6,42±0,25 | 1,12±0,10 | 73,09±1,01 |

Таблица 5. Жирнокислотный состав липидов радужной форели при выращивании на комбикормах с заменой рыбьего жира растительными маслами

Table 5. Fatty acid composition of rainbow trout lipids on diets with the replacement of fish oil with vegetable oils

| Наименование кислоты | Шифр кислоты | Содержание жирных кислот, % от суммы | | | | | КРФР 0/7/8 | Контроль |
|--------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| | | До эксперимента | КРФР 15/0/0 | КРФР 8/4/3 | КРФР 4/6/5 | КРФР 0/7/8 | | |
| Миристиновая | 14:0 | 2,35 | 3,50 | 2,47 | 2,21 | 1,90 | 2,21 | |
| Пальмитиновая | 16:0 | 12,43 | 13,87 | 13,40 | 13,34 | 12,25 | 11,81 | |
| Стеариновая | 18:0 | 3,39 | 3,76 | 3,62 | 3,73 | 3,51 | 3,33 | |
| Пальмитолеиновая | 16:1 | 3,19 | 4,37 | 3,54 | 3,23 | 2,71 | 3,05 | |
| Олеиновая | 18:1 | 33,20 | 27,84 | 32,57 | 33,76 | 34,38 | 33,90 | |
| Гондоиновая | 20:1 | 3,84 | 3,09 | 3,09 | 3,06 | 3,05 | 3,50 | |
| Линолевая | 18:2 n-6 | 25,92 | 18,25 | 24,24 | 24,46 | 27,11 | 26,47 | |
| Альфа-линоленовая | 18:3 n-3 | 2,55 | 2,18 | 3,11 | 3,73 | 3,76 | 2,53 | |
| Гамма-линоленовая | 18:3 n-6 | 0,55 | 0,62 | 0,47 | 0,50 | 0,57 | 0,50 | |
| Эйкозодиеновая | 20:2 | 1,53 | 1,70 | 1,33 | 1,24 | 1,50 | 1,57 | |
| Арахидоновая | 20:4 n-6 | 0,46 | 0,70 | 0,44 | 0,43 | 0,46 | 0,48 | |
| Эйкозапентаеновая | 20:5 n-3 | 1,75 | 2,72 | 1,96 | 1,77 | 1,36 | 1,58 | |
| Докозагексаеновая | 22:6 n-3 | 5,66 | 7,53 | 6,44 | 6,12 | 4,41 | 5,52 | |
| Прочие | | 3,18 | 9,87 | 3,34 | 3,42 | 3,03 | 3,57 | |
| Сумма ПНЖК | | 39,78 | 35,63 | 39,17 | 38,47 | 40,48 | 40,28 | |
| Сумма омега-3 | | 10,22 | 12,89 | 11,74 | 10,92 | 9,77 | 9,88 | |
| Сумма омега-6 | | 27,86 | 20,80 | 25,91 | 26,14 | 29,05 | 28,66 | |
| Сумма ЭПК и ДГК | | 7,41 | 10,25 | 8,40 | 7,89 | 5,77 | 7,09 | |
| Сумма ЭПК и ДГК, г/100 г | | 0,55 | 0,73 | 0,66 | 0,55 | 0,42 | 0,46 | |

жании и соотношении жирных кислот омега-3 и омега-6 у радужной форели. Жирнокислотный состав мышечной ткани форели, получавшей контрольный корм, практически идентичен показателям для рыбы до начала эксперимента, что закономерно, так как при проведении исследований изменился только размер гранул, но не компонентный состав корма.

Таким образом, ввод в состав комбикормов рапсового и соевого масел, содержавших высокий уровень линолевой (омега-6) и альфа-линоленовой (омега-3) жирных кислот, обеспечил запуск процессов элонгации и десатурации в тканях радужной форели. В результате, дефицит длинноцепочечных ПНЖК в кормах был компенсирован за счёт их синтеза и в процессе роста рыб происходило увеличение содержания ЭПК и ДГК.

Данные по общему химическому и жирнокислотному составу мышечной ткани форели свидетельствуют о том, что по содержанию жира, соотношению суммы омега-3 к омега-6 кислотам, лучшие результаты были получены у рыб, выращенных на комбикормах КРФР 15/0/0, КРФР 4/6/5, КРФР 8/4/3. Лучшие ростовые показатели отмечены на кормах КРФР 15/0/0 и КРФР 4/6/5.

Оценивая эффект применения различных липидных добавок по комплексу рыбоводных, физиологических и биохимических параметров, можно говорить, что наиболее близкий результат относительно корма, включавшего только рыбий жир, был получен при использовании корма КРФР 4/6/5. Это говорит о возможности полноценной замены части рыбьего жира растительными маслами.

Рассматривая выращенную нами форель, как объект питания человека, следует отметить, что согласно рекомендациям ВОЗ потребление ЭПК+ДГК должно составлять от 0,5 до 1 г/сут [Tocher et al., 2019]. С этих позиций форель, получавшая с кормом только рыбий жир, имела некоторое преимущество перед форелью, получавшей смесь рыбьего жира и растительных масел, даже в случае оптимального варианта кормления. Принимая во внимание диапазон различий по показателям суммы ЭПК и ДГК, полученный в разных вариантах кормления, свидетельствующий о наличии процессов элонгации и десатурации у форели, можно говорить о целесообразности дальнейшего поиска оптимальных сочетаний источников и соотношения составляющих липидной части комбикормов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований установлено, что содержание и соотношение ПНЖК семейства омега-3 и омега-6 в комбикормах для радужной форели изменялось при увеличении доли рапсового и соевого масла в рецептуре. Самые высокие ростовые показатели и выживаемость при более низких затратах комбикорма выявлены у рыб, выращиваемых на кормах без замены рыбьего жира и кормах КРФР 4/6/5 с использованием смеси рыбьего жира, рапсового и соевого масла. Замена в рецептах кормов рыбьего жира на растительные масла не оказала отрицательного влияния на химический состав мышечной ткани радужной форели. Ввод в состав комбикормов рапсового и соевого масел, содержащих альфа-линоленовую кислоту, за счёт процессов элонгации и десатурации в тканях радужной форели обеспечил увеличение количества необходимых для питания человека эйкозапентаеновой и докозагексаеновой жирных кислот.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы были соблюдены.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания Росрыболовства № 076–00007–22–00.

ЛИТЕРАТУРА

- Гладышев М.И. 2021. Наземные источники полиненасыщенных жирных кислот для аквакультуры // Вопросы ихтиологии. Т. 61. № 4. С. 471–485. DOI: 10.31857/S0042875221030048.
- Новоженин Н.П. 2010. Развитие форелеводства в России в современных условиях и селекционно-племенная работа (аналитические аспекты) // Научные основы сельскохозяйственного рыболовства: состояние и перспективы развития. М.: ВНИИР Россельхозакадемии. С. 74–120.
- Молчанова К.А., Хрусталев Е.И. 2017. Сравнение морфометрических показателей у производителей радужной форели, выращиваемых в УЗВ // Рыбное хозяйство. № 3. С. 91–94.
- Остроумова И.Н. 2012. Биологические основы кормления рыб. СПб: Изд-во «Лема». 564 с.
- Панов В.П., Лавровский В.В., Есавкин Ю.И. 1991. Химический состав мышечной ткани и пищевая ценность радужной форели при разных сроках реализации // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. № 5. С. 167–173.
- Поддубная И.В., Котельникова Е.А. 2017. Товарные качества радужной форели при использовании в кормлении йодированных дрожжей // Актуальные вопросы производства продукции животноводства и рыболовства. Мат. Межд. науч.-практ. конф., 02–03 марта 2017 года. Саратов: СГАУ им. Н.И. Вавилова. С. 225–230.
- Правдин И.Ф. 1966. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая пром-ть. 96 с.
- Соколов А.В., Дворянинова О.П. 2019. Оценка эффективности производственного корма для радужной форели // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. № 3. С. 53–62.
- Титарев Е.Ф. 2007. Холодноводное форелеводство. М.: Пищевая пром-ть. 280 с.
- Щербина М.А., Гамыгин Е.А. 2006. Кормление рыб в пресноводной аквакультуре. М.: Изд-во ВНИРО, 360 с.
- Barry K., Trushenski J. 2019. Reevaluating Polyunsaturated Fatty Acid Essentiality in Rainbow Trout // North American J. of Aquaculture. V. 82. DOI: 10.1002/naaq.10133.
- Gesto M., Madsen L., Andersen N.R., Kertaoui N.E., Kestemont P., Jokumsen A., Lund I. 2021. Early performance, stress- and disease-sensitivity in rainbow trout fry (*Oncorhynchus mykiss*) after total dietary replacement of fish oil with rapeseed oil. Effects of EPA and DHA supplementation // Aquaculture. V. 536. P. 736446. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736446>
- Lima B.T.M., Takahashi N.S., Tabata Y.A., Hattori R.S., Ribeiro C., Moreira R.G. 2019. Balanced omega-3 and -6 vegetable oil of Amazonian sacha inchi act as LC-PUFA precursors in rainbow trout juveniles: Effects on growth and fatty acid biosynthesis // Aquaculture. V. 509. P. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.05.004>
- Nasopoulou C., Zabetakis I. 2012. Benefits of fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds. A review // LWT – Food Science and Technology. V. 47, Is. 2. P. 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.018>
- Nutrient Requirements of Fish and Shrimp. 2011. // Washington DC: The National Academies Press. 376 p.
- Sales J., Glencross B. 2011. A meta-analysis of the effects of dietary marine oil replacement with vegetable oils on growth, feed conversion and muscle fatty acid composition of fish species // Aquaculture Nutrition. V.17: P. 271–287. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00761.x>
- Sargent J., Bell G., McEvoy L., Tocher D., Estevez A. 1999. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish // Aquaculture. V. 177. P. 191–199.
- Tacon A.G.J., Metian M. 2008 Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects // Aquaculture V. 285 P. 146–158.
- Tocher D.R. 2003. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish // Reviews in Fisheries Science. V. 11. P. 107–184.
- Tocher D.R., Betancor M.B., Sprague M., Olsen R.E., Napier J.A. 2019. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: bridging the gap between supply and demand // Nutrients. V. 11. P. 89. <https://doi.org/10.3390/nu11010089>

- Trushenski J., Schwarz M., Bergman A., Rombenso A.N., Delbos B. 2012. DHA is essential, EPA appears largely expendable, in meeting the n-3 long-chain polyunsaturated fatty acid requirements of juvenile coibia *Rachycentron canadum* // *Aquaculture*. V. 326–329. P. 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.033>
- Turchini G.M., Francis D.S., Keast R.S.J., Sinclair A.J. 2011. Transforming salmonid aquaculture from a consumer to a producer of long chain omega-3 fatty acids // *Food Chem.* V. 124. P. 609–614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.083>
- Turchini G.M., Hermon K.M., Francis D.S. 2018. Fatty acids and beyond: Fillet nutritional characterisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed different dietary oil sources // *Aquaculture*. V. 491. P. 391–397 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.056>
- Turchini G.M., Torstensen B.E., Ng W.K. 2009. Fish oil replacement in finfish nutrition // *Reviews in Aquaculture*. V. 1. P. 10–57. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01001.x>
- Yıldız M., Eroldoğan T.O., Ofori-Mensah S., Engin K., Ali Baltacı M. 2018. The effects of fish oil replacement by vegetable oils on growth performance and fatty acid profile of rainbow trout: Re-feeding with fish oil finishing diet improved the fatty acid composition // *Aquaculture*. V. 488. P. 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.030>
- REFERENCES**
- Gladyshev M.I. 2021. Terrestrial sources of polyunsaturated fatty acids for aquaculture // *Journal of Ichthyology*. V. 61. № 4. P. 632–645 (In Russ.).
- Novozhenov N.P. 2010. Development of trout breeding in Russia in modern conditions and breeding work (analytical aspects) // *Scientific foundations of agricultural fish farming: state and prospects of development*. Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Fish Farming. P. 74–120 (In Russ.).
- Molchanova K.A., Khrustal'ov E.I. 2017. Comparison of CWF-grown rainbow trout morphometric indicators // *Fish Industry (Rybnoe Khozaystvo)*. № 3. P. 91–94 (In Russ.).
- Ostroumova I.N. *Biological basis for fish nutrition*. SPb, Lema. 564 p. (In Russ.).
- Panov V.P., Lavrovskiy V.V. Esavkin Yu. I. 1991. Chemical composition of muscle tissue and nutritional value of rainbow trout at different terms of sale // *Izvestiya Timiryazevskaya Agricultural Academy*. № 5. P. 161–173 (In Russ.).
- Podubnaya I.V., Kotelnikova E.A. 2017. Marketable quality of rainbow trout fed with iodized yeast // *Topical issues of animal husbandry and fish farming: Materials of the International Scientific and Practical Conference, 02–03 March 2017. Saratov: SSAU named after N.I. Vavilov*. P. 225–230 (In Russ.).
- Pravdin I.F. 1966. *Manual for fish study* Pishchevaya Promyshlennost', Moscow. 96 p. (In Russ.).
- Sokolov A.V., Dvoivaninova O.P. 2019. Evaluation of the efficiency of the production feed for rainbow trout // *Technologies of the food and processing industry of the agro-industrial complex – healthy food products*. № 3. P. 53–62 (In Russ.).
- Shcherbina M.A., Gamygin E.A. 2006. *Fish feeding in freshwater aquaculture* VNIRO Publishing, Moscow. 360 p. (In Russ.).
- Titarev E.F. 2007. *Coldwater trout farming*. Pishchevaya Promyshlennost', Moscow. 280 p. (In Russ.).
- Barry K., Trushenski J. 2019. Reevaluating Polyunsaturated Fatty Acid Essentiality in Rainbow Trout // *North American J. of Aquaculture*. V. 82. DOI: 10.1002/naaq.10133.
- Gesto M., Madsen L., Andersen N.R., Kertaoui N.E., Kestemont P., Jokumsen A., Lund I. 2021. Early performance, stress- and disease-sensitivity in rainbow trout fry (*Oncorhynchus mykiss*) after total dietary replacement of fish oil with rapeseed oil. Effects of EPA and DHA supplementation // *Aquaculture*. V. 536. P. 736446. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736446>
- Lima B.T.M., Takahashi N.S., Tabata Y.A., Hattori R.S., Ribeiro C., Moreira R.G. 2019. Balanced omega-3 and -6 vegetable oil of Amazonian sacha inchi act as LC-PUFA precursors in rainbow trout juveniles: Effects on growth and fatty acid biosynthesis // *Aquaculture*. V. 509. P. 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.05.004>
- Nasopoulou C., Zabetakis I. 2012. Benefits of fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds. A review // *LWT – Food Science and Technology*. V. 47, Is. 2. P. 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.01.018>
- Nutrient Requirements of Fish and Shrimp*. 2011. // Washington DC: The National Academies Press. 376 p.
- Sales J., Glencross B. 2011. A meta-analysis of the effects of dietary marine oil replacement with vegetable oils on growth, feed conversion and muscle fatty acid composition of fish species // *Aquaculture Nutrition*. V.17: P. 271–287. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00761.x>
- Sargent J., Bell G., McEvoy L., Tocher D., Estevez A. 1999. Recent developments in the essential fatty acid nutrition of fish // *Aquaculture*. V. 177. P. 191–199.
- Tacon A.G.J., Metian M. 2008 Global overview on the use of fish meal and fish oil in industrially compounded aquafeeds: Trends and future prospects // *Aquaculture* V. 285 P. 146–158.
- Tocher D.R. 2003. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish // *Reviews in Fisheries Science*. V. 11. P. 107–184.
- Tocher D.R., Betancor M.B., Sprague M., Olsen R.E., Napier J.A. 2019. Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: bridging the gap between supply and demand // *Nutrients*. V. 11. P. 89. <https://doi.org/10.3390/nu11010089>
- Trushenski J., Schwarz M., Bergman A., Rombenso A.N., Delbos B. 2012. DHA is essential, EPA appears largely expendable, in meeting the n-3 long-chain polyunsaturated fatty acid requirements of juvenile coibia *Rachycentron canadum* // *Aquaculture*. V. 326–329. P. 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.033>
- Turchini G.M., Francis D.S., Keast R.S.J., Sinclair A.J. 2011. Transforming salmonid aquaculture from a consumer to a producer of long chain omega-3 fatty acids // *Food Chem.* V. 124. P. 609–614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.083>

Turchini G.M., Hermon K.M., Francis D.S. 2018. Fatty acids and beyond: Fillet nutritional characterisation of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed different dietary oil sources // *Aquaculture*. V. 491. P. 391–397 <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.11.056>

Turchini G.M., Torstensen B.E., Ng W.K. 2009. Fish oil replacement in finfish nutrition // *Reviews in Aquaculture*. V. 1. P. 10–57. <https://doi.org/10.1111/j.1753-5131.2008.01001.x>

Yıldız M., Eroldoğan T.O., Ofori-Mensah S., Engin K., Ali Baltacı M. 2018. The effects of fish oil replacement by vegetable oils

on growth performance and fatty acid profile of rainbow trout: Re-feeding with fish oil finishing diet improved the fatty acid composition // *Aquaculture*. V. 488. P. 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.12.030>

*Поступила в редакцию 20.12.2021 г.
Принята после рецензии 29.04.2022 г.*