

Научная статья

УДК 59.088.577.11.53

DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-54-67

Исследование пула жирных кислот в мышцах радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) из садковой аквакультуры (р. Ангара, г. Иркутск)

Галина Афанасьевна Федорова¹, Алена Александровна Никонова², Ольга Александровна Белых³, Ольга Юрьевна Глызина⁴

^{1,2,4} Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

¹ fgalina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1697-8631>

² alenaxis@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5599-0329>

³ olga.belykh@klgtu.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-7274-1420>

⁴ ladis1961@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6449-0497>

Аннотация. Впервые проведен биохимический анализ садковой аквакультуры радужной форели, содержащейся в р. Ангаре. Тестируемые особи содержались в садках в черте г. Иркутска при температуре 12–15 °С, получали корм Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ) в количестве 2 % от веса рыб. Определение содержания жирных кислот (ЖК) в экстрактах липидной фракции тканей (белые мышцы) рыб выполняли методами газовой хроматографии с масс-спектрометрическим (ГХ-МС) и пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПИД). Выявлены взаимосвязи состава корма и физиологических и биохимических процессов роста и развития аквакультуры форели. Исследованы липиды белых мышц половозрелых особей *Parasalmo mykiss*, содержащихся в садках прибрежной пелагиали реки. В составе общих липидов в мышцах исследованных особей доминировали докозагексаеновая и олеиновая кислоты. Показана роль ω -3 и ω -6 жирных кислот в организме рыб и их соотношение, приведены новые данные о механизме действия этих кислот. Рекомендовано соотношение ω -3 и ω -6 1:1. Рассмотрена ценность потребления радужной форели как источника полиненасыщенных кислот. Установлено высокое содержание физиологически значимых ω -3 полиненасыщенных жирных кислот в мышцах садковой аквакультуры радужной форели. Указано, что в качестве полноценных продуктов питания лучше использовать мясо рыбы, чем ее жир. Полученные данные характеризуют исследованных рыб как качественный продукт аквакультуры, содержащий высокий процент эссенциальных жирных кислот на фоне хорошей адаптации рыб к условиям их содержания, включающим кормовую базу.

Ключевые слова: лососевые рыбы, липиды, радужная форель, жирные кислоты, комбикорм, аквакультура.

Для цитирования: Федорова Г. А., Никонова А. А., Белых О. А., Глызина О. Ю. Исследование пула жирных кислот в мышцах радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) из садковой аквакультуры (р. Ангара, г. Иркутск) // Известия КГТУ. 2025. № 79. С. 54–67. DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-54-67.

Original article

Study of fatty acids in the muscles of garden aquaculture rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Angara river, Irkutsk)

Galina A. Fedorova¹, Alyona A. Nikonova², Ol'ga A. Belykh³✉, Ol'ga Yu. Glyzina⁴

^{1,2,4} Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

³ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

¹ fgalina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1697-8631>

² alenaxis@list.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5599-0329>

³ olga.belykh@klgtu.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7274-1420>

⁴ ladis1961@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6449-0497>

Abstract. The article presents a biochemical analysis of cage aquaculture of rainbow trout contained in the Angara River that has been carried out for the first time. The tested individuals were kept in cages on the Angara River, within the city of Irkutsk, at a temperature of 12-15. We received the feed Appens GROWER EF in the amount of 2% of the fish weight. Determination of the LC content in extracts of the lipid fraction of fish tissues (white muscles) have been performed by gas chromatography with mass spectrometric and flame ionization detection methods. The interrelationships of the feed composition and the physiological and biochemical processes of growth and development of trout aquaculture have been revealed. Lipids of white muscles of mature *Parasalmo mykiss* individuals kept in cages of the coastal pelagic river have been studied. Docosahexaenoic and oleic acids dominated in the total lipids in the muscles of the studied individuals. The role of ω -3 and ω -6 fatty acids in the body of fish and their ratio has been discussed. The article considers the value of consuming rainbow trout as a source of polyunsaturated acids. A high content of physiologically significant ω -3 polyunsaturated fatty acids has been found in the muscles of rainbow trout from the Angara River cage aquaculture. It is indicated that it is better to use fish meat as full-fledged food than its fat. The data obtained characterize the fish studied as a high-quality aquaculture product containing a high percentage of essential fatty acids against the background of a good adaptation of fish to the conditions of their maintenance, including feed.

Key words: salmon fish, lipids, rainbow trout, fatty acids, compound feed, aquaculture.

For citation: Fedorova G. A., Nikonova A. A., Belykh O. A., Glyzina O. Yu. Study of fatty acids in the muscles of garden aquaculture rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Angara river, Irkutsk). *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2025;(79):54–67. (In Russ.). DOI 10.46845/1997-3071-2025-79-54-67.

ВВЕДЕНИЕ

Рыба и рыбная продукция являются основным источником эссенциальных жирных кислот, необходимых в рационе питания человека. Липидные компоненты (в том числе жирные кислоты, ЖК) необходимы для нормального обмена веществ, и их отсутствие или недостаток в рационе питания может привести к различным заболеваниям, поскольку липиды влияют на процессы всасывания, трансформации и обмена жиров в организме.

Радужная форель – один из распространенных объектов аквакультуры. Содержание жира и, соответственно, вкусовые качества форели могут меняться в зависимости от времени года и стадии созревания половых продуктов. Исследования последних лет показывают, что качество аквакультуры рыб зависит от биологических особенностей рыб, условий содержания и кормления и определяет пищевую ценность рыбной продукции [1–4].

Существует ряд комплексных работ по оценке состояния морских рыб на основании биохимических показателей [5–8] и рыб, выловленных из внутренних водоемов [9]. Исследований на пресноводных рыбах, обитающих в естественных условиях, проведено значительно меньше.

В последнее время вопросам жирнокислотного состава морских и пресноводных промысловых гидробионтов уделяется особое внимание. Сравнение жирнокислотного состава образцов рыбы с фермы и «дикой» форели выявило более высокое содержание ЖК в образцах рыбы с ферм. Все рыбы, выведенные на фермах, обладали более высоким содержанием эйкозапентаеновой (ЭПК), докозагексаеновой (ДГК) и олеиновой кислот, чем дикие. В условиях аквакультуры стальноголовая форель (Steelhead) способна регулировать состав жирных кислот в организме независимо от их содержания в корме, что предоставляет возможность селекционного разведения форели с большей пищевой ценностью [10].

Физиологически значимые ЖК ω -3 и ω -6 относят к важным для питания человека липидам. Установлено, что для животной клетки оптимальное соотношение жирных кислот ω -6/ ω -3 в суточном рационе должно составлять от 5:1 до 10:1 [2, 3, 11], поэтому при получении аквакультуры пресноводных рыб важно контролировать параметры липидного статуса – содержание эссенциальных ненасыщенных жирных кислот и их соотношение.

Поступление физиологически значимых ЖК с кормом в необходимых концентрациях имеет решающее значение для быстрого роста рыб [12]. ЖК участвуют в транспорте жирорастворимых витаминов и являются предшественниками эйкозаноидов и гормонов у рыб [13]. Экзогенные ЖК влияют на репродукцию, осморегуляцию, иммунитет (устойчивость к болезням) и реакцию рыб на стрессы.

Данная работа относится к начальному этапу исследований состава ЖК в мышцах радужной форели садковой аквакультуры как маркера адаптации рыбы к условиям холодноводного водоема.

Цель работы – оценка жирнокислотного состава мышц радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) холодноводной садковой аквакультуры при кормлении рыб комбикормом без добавления в рацион питания живых кормов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Особь радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), отобранные для исследования, содержались в садках единственного в регионе предприятия ООО НПО «Иркутская форель» на р. Ангаре, в черте г. Иркутска. Температура воды составляла 12–15 °С. Форель регулярно проходит проверку специалистами ветеринарной службы и Россельхознадзора на соответствие стандартам.

Для кормления рыбы использовали гранулированный корм Appens GROWER EF с размером гранулы 3–4,5 мм (Alltech Coppens, ФРГ), состав корма представлен в табл. 1.

Таблица 1. Состав комбикорма Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ)

Table 1. Composition of compound feed Appens GROWER EF (Alltech Coppens, FRG)

Состав комбикорма	Компоненты	Витамины и добавки
Рыбная мука	Сырой протеин – 42 %	Витамин А – 10000 МЕ/кг
Соевый белковый концентрат	Сырой жир – 13 %	Витамин D ₃ – 2331 МЕ/кг
Пшеничная клейковина	Клетчатка – 2,7 %	Железо – 60 мг/кг
Пшеница	Зола – 9 %	Йод – 5 мг/кг
Рыбий жир	Фосфор – 1,39 %	Медь – 5 мг/кг
Кукурузная клейковина	Кальций – 1,6 %	Марганец – 20 мг/кг
Дрожжевые продукты		Цинк – 60 мг/кг
Рапсовое масло		

Кормление форели проводили с 8.00 до 22.00 ч в течение 10 мес. Суточная доза корма для особи форели возрастом от 2 до 10 мес. составляла в среднем 2 % от средней массы рыбы в соответствии с классическими методами содержания аквакультуры этого вида рыб [14].

Подготовку проб (гомогенизация, экстракция) комбикорма и тканей (белые мышцы) рыб возрастом 10 мес. выполняли методами классической липидологии [12]. Для определения содержания ЖК в экстрактах липидных фракций использовали метод газовой хроматографии с масс-спектрометрическим (ГХ-МС) и пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПИД).

Получение метиловых эфиров жирных кислот. Определение содержания ЖК проводили в виде их метиловых эфиров (МЭЖК), полученных путем этерификации липидной фракции белых мышц. Для выделения общих липидов из навесок образцов тканей массой 0,3–0,7 г (точная навеска) применяли трехкратную экстракцию смесью Фолча (хлороформ-метанол = 2:1, об/об, 2 мл) в ультразвуковой ванне (10 мин). К объединенному экстракту добавляли воду до соотношения хлороформ – метанол – вода = 2 : 1 : 1 (об/об) и оставляли на сутки при +4 °С. После центрифугирования (3000 g) отбирали нижний слой, сушили с безводным Na₂SO₄, переносили в предварительно взвешенную пробирку и концентрировали досуха в токе аргона. Количество общих липидов определяли гравиметрическим методом.

Для получения метиловых эфиров к полученной фракции липидов добавляли 0,6 мл 2 % -го раствора H₂SO₄ в MeOH и помещали в термостат при 75 °С на 2 ч. Реакционную смесь охлаждали до комнатной температуры, проводили трехкратную экстракцию *n*-гексаном (по 0,5 мл), экстракты объединяли и промывали дистиллиро-

ванной водой. После высушивания (Na_2SO_4) экстракты центрифугировали и использовали для анализа методами ГХ-МС и ГХ-ПВД.

Газовая хроматография с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). Подготовленные образцы анализировали на хроматомасс-спектрометре Agilent GC 6890, MSD 5973N (Agilent, США) с колонкой Rxi®-5Sil MS(30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, Restek, США) в режиме программирования температуры от 120 до 240 °C со скоростью 5 °C/мин и от 240 до 300 °C со скоростью 5 °C/мин; изотерма 300 °C – 5 мин. Температура дозатора 250 °C; объем вводимой в колонку пробы 3 мкл в режиме без деления потока. Детектирование пиков МЭЖК проводили в режиме сканирования масс-спектра в диапазоне значений m/z 42–450.

Газовая хроматография с пламенно-ионизационным детектированием (ГХ-ПВД). Подготовленные образцы анализировали на газовом хроматографе Shimadzu GC-2010 Plus (Shimadzu, Япония) с колонкой GC Вр-5MS, 30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм, Trajan Scientific) в режиме программирования температуры от 120 до 240 °C со скоростью 5 °C/мин и от 240 до 300 °C со скоростью 5 °C/мин; изотерма 300 °C – 5 мин. Температура дозатора 340 °C; температура детектора (ПВД) 340 °C; объем вводимой в колонку пробы 3 мкл в режиме без деления потока.

Идентификация пиков МЭЖК на хроматограммах проводилась по библиотеке масс-спектров Nist Mass Spectral Database с использованием программного обеспечения MS Search v. 1.7a (2000).

Оценка правильности. Для оценки систематической погрешности определения концентрации МЭЖК в мышцах рыб применяли метод добавок. В качестве добавки использовали образец рыбьего жира Fish Oil T14165QC (Supelco, Sigma-Aldrich Co. LLC, США) с установленными межлабораторно значениями содержаний ЖК. После гомогенизации образцов проб к двум параллельным навескам добавляли известное количество раствора добавки Fish Oil T14165QC и проводили экстракцию, метанолиз и ГХ-анализ, как описано выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа общего липидного и жирнокислотного состава используемого для кормления форели комбикорма представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2. Содержание общих липидов комбикорма Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ)

Table 2. Total lipid content of compound feed Appens GROWER EF (Alltech Coppens, FRG)

Показатели	Содержание общих липидов, % сухой массы
Общие липиды	22,16
Триацилглицерины	10,70
Фосфолипиды	6,16
Холестерин	3,93
Эфиры холестерина	1,37

Общий липидный состав комбикорма. Содержание общих липидов в количестве 22 % от сухой массы и выявленное соотношение групп общих липидов в исследованном корме позволяет сделать вывод о наличии необходимых составляющих для активного развития и роста форели, так как эти показатели близки к соответствующим показателям кормов, рекомендованных для аквакультуры [15]. Содержание липидной биомассы в большинстве кормов достигает 55–65 % жира, но сами корма значительно различаются по содержанию жирных кислот и соотношению типов кислот (НЖК/МНЖК/ПНЖК), что сказывается на росте и развитии выращиваемых рыб [11, 14].

Жирнокислотный состав комбикорма. В комбикорме Appens GROWER EF (Alltech Corpens, ФРГ) идентифицировано 32 ЖК, из них НЖК – 11, МНЖК – 7, ПНЖК – 14 (полный список идентифицированных кислот в статье не приводится). В табл. 3 показаны данные по содержанию доминирующих ЖК в используемом комбикорме и в мышцах радужной форели.

Таблица 3. Доминирующие жирные кислоты в мышцах радужной форели и комбикорме

Table 3. Dominant fatty acids in rainbow trout muscles and compound feed

Жирные кислоты	Жирные кислоты (ЖК) в мышцах, % суммы			Комби-корм
	1	2	3	
16:0	17,74	18,54	18,10	12,20
18:0	4,61	3,32	4,66	2,56
Сумма насыщенных ЖК	21,41	23,17	23,02	18,85
16:1 ω-7	3,57	2,82	2,90	3,23
18:1 ω-9	35,97	31,16	32,00	34,08
18:1 ω-11	2,17	1,82	2,05	–
20:1 ω-9	1,59	1,94	2,25	5,63
Сумма мононенасыщенных ЖК	56,48	41,44	42,71	49,48
18:3 ω-3	–	–	–	3,77
20:3 ω-3	0,83	1,22	0,97	0,24
20:5 ω-3 (ЭПК)	2,46	3,16	2,45	3,52
22:6 ω-3 (ДГК)	9,95	13,02	13,45	6,40
Сумма полиненасыщенных ЖК (ω-3)	13,79	18,02	17,18	13,93
18:2 ω-6	14,15	11,79	12,33	16,20
20:4 ω-6 (АРК)	1,25	1,65	1,38	0,43
Сумма полиненасыщенных ЖК (ω-6)	15,40	13,44	13,71	17,74
Сумма полиненасыщенных ЖК	29,19	31,46	30,89	31,67
Соотношение ω-6/ω-3	1,0:1,1	0,7:1,0	0,8:1,0	1,3:1,0

Насыщенные жирные кислоты (НЖК). Уровень НЖК комбикорма составил 18,9 %. НЖК являются энергетической основой в метаболизме рыб [12]. Показано, что в исследованном комбикорме среди НЖК доля пальмитиновой кислоты (16:0) составляла около 65 % от суммы НЖК (кислота характерна для растительных жиров, которые и входят в состав комбикормов). Второй по содержанию среди НЖК была стеариновая (18:0) кислота. Уровни других НЖК составляли менее 1 %.

Мононенасыщенные жирные кислоты (МНЖК). В комбикорме олеиновая кислота (18:1ω-9) занимает около 69 % от суммы МНЖК. На долю пальмитолеино-

вой (16:1 ω -7), вакценовой (18:1 ω -7) и гондоиновой (20:1 ω -9) кислот приходится более 15 % от суммы МНЖК. Содержание остальных исследованных МНЖК было менее 1 % от общей суммы ЖК. Характерной чертой жирнокислотного состава исследованного комбикорма является высокое содержание мононенасыщенных жирных кислот (С18:1 ω -9) – 56 %.

Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК) исследованного корма представлены семействами ω -3 и ω -6. Превалирующим компонентом среди ω -6 ПНЖК в изученном комбикорме была линолевая кислота (18:2 ω -6), ее доля среди ω -6 ПНЖК достигала 94 %. Уровень арахидоновой кислоты (20:4 ω -6) составил 1,4 % от общей суммы ПНЖК.

Наличие важных кислот линоленового ряда – эйкозапентаеновой (20:5 ω -3), докозапентаеновой (22:5 ω -3) и докозагексаеновой (22:6 ω -3) – соответствовало рекомендованному разработчиками кормов уровню, что свидетельствует о высоком качестве исследованного комбикорма, так как высокое содержание эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот в кормах для радужной форели повышает темп роста рыб [2, 16].

Можно предположить, что при производстве этого корма в качестве источника липидной составляющей использовался в основном рыбий жир, в состав которого входят эйкозапентаеновая и докозагексаеновая кислоты. В последнее время в связи с ускоренными темпами развития аквакультуры рыбий жир является дефицитным и дорогостоящим. Чаще в комбикорме используют растительные масла и животные жиры, в которых либо нет арахидоновой, эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот, либо эти кислоты присутствуют в малых количествах.

Среди незаменимых ЖК, которые поступают в организм рыб только с кормом, выявлен высокий уровень линоленовой кислоты.

Потребность в ω -3 ПНЖК и ω -6 ПНЖК у радужной форели может быть удовлетворена, если в составе корма присутствуют линоленовая и линолевая кислоты в достаточном количестве. Данный вид рыб обладает способностью трансформировать эти кислоты в длинноцепочечные с четырьмя–шестью двойными связями (эйкозапентаеновую, докозагексаеновую, арахидоновую и др.).

Дисбаланс в соотношении незаменимых жирных кислот – одна из главных причин снижения скорости роста рыб, ухудшения их физиологического состояния, жизнестойкости и адаптационных возможностей. При меньшем количестве ПНЖК в составе корма наблюдаются потеря аппетита, снижение скорости роста, ухудшение усвоения пищи у лососевых [2].

Незаменимые полиненасыщенные жирные кислоты участвуют в основных физиологических процессах и адаптациях рыб, влияя на жидкость биомембран и активность белков, в том числе ферментов [12].

Результаты исследований позволили сделать вывод, что состав корма Appens GROWER EF (Alltech Coppens, ФРГ) позволяет удовлетворить физиологическую потребность форели в незаменимых ω -3 и ω -6 ЖК. В дальнейшем, в связи с тем, что исследованные корма официально не поставляются, кормление рыб будет осуществляться аналогичными по составу отечественными комбикормами, например, Aller Bronze (Аквафид, Россия).

Жирнокислотный состав белых мышц. Проведено исследование жирнокислотного состава белых мышц радужной форели (3 особи). Идентифицировано

26 кислот, НЖК – 10, МНЖК – 8, ПНЖК – 8 (полный список идентифицированных кислот в статье не приводится).

Мышцы и внутренний жир являются основными тканями для запасания липидов у лососевых рыб, чем и был обусловлен выбор объекта исследования в данной работе. Содержание ЖК в корме и мышцах практически не отличалось по составу и соотношению кислот. Из корма в организм рыб поступают НЖК, МНЖК и ПНЖК. В организме животных, в том числе и рыб, НЖК и МНЖК входят в состав триацилглицеринов (ТАГ), используемых в качестве источников энергии, а ПНЖК в основном – в состав фосфолипидов, которые формируют биологические мембраны.

Насыщенные жирные кислоты. Уровень НЖК мышц составил 21–23 % от общей суммы кислот, идентифицированных в мышцах. Наблюдалось самое высокое содержание пальмитиновой (C16:0) и стеариновой (18:0) кислот, которые входят в состав комбикорма.

Мононенасыщенные жирные кислоты исследованных образцов представлены восемью кислотами, составляющими 41–46 % от общей суммы кислот, которые идентифицированы в мышцах рыб.

Основным представителем МНЖК была олеиновая (18:1 ω -9) кислота. Ее содержание в мышцах варьирует в диапазоне 31–35 %, что близко к ее содержанию в комбикорме (34 %). Также в мышцах исследованных рыб выявлено наличие в небольших количествах (табл. 3) других важных для организма человека МНЖК, таких как миристолеиновая (C14:1) и пальмитолеиновая (16:1 ω -7). На долю пальмитолеиновой (16:1 ω -7), вакценовой (18:1 ω -7) и гондоиновой (20:1 ω -9) кислот приходится более 15 % суммы МНЖК. Содержание остальных исследованных МНЖК было менее 1 % от суммы ЖК. Характерной чертой жирнокислотного состава исследованных мышц является высокое содержание олеиновой и пальмитолеиновой кислот (18:1 ω -9, C16:1 ω -7) – 56%.

Кислоты ω -9 могут быть синтезированы человеческим организмом из ненасыщенных ω -3 и ω -6 жирных кислот и, следовательно, не являются необходимыми в диете.

На развитие и рост радужной форели влияют входящие в состав липидов ПНЖК. Они играют важную роль в адаптации мембранных структур клеток экотермных организмов к изменениям условий внешней среды и выполняют ряд важных функций, например, являются предшественниками эйкозаноидов [17, 18]. Однако собственный синтез ПНЖК в организме рыб не восполняет их физиологически необходимое количество [3], поэтому для нормального развития радужной форели необходим высокий уровень длинноцепочечных ПНЖК семейства ω -3 (таких как эйкозапентаеновая 20:5 ω -3 и докозагексаеновая 22:6 ω -3 кислоты) в комбикорме, которые способствуют активному росту рыб [18]. Незаменимые ПНЖК семейства ω -6 представляла линолевая (18:2 ω -6) кислота.

Соотношение ω -3 и ω -6. ПНЖК исследованных образцов мышц рыб представлены семействами ω -3 и ω -6 в соотношении, практически равном 1:1.

По литературным данным, рекомендованное соотношение ω -3/ ω -6 изменялось со временем. Например, по рекомендации Роспотребнадзора, основанной на Методических рекомендациях МР 2.3.1.2432-08 (2009 г), соотношение ω -3/ ω -6 должно быть 5–10/1 [19]. Поздние документы, в том числе документы ВОЗ и России, рекомендуют более низкое соотношение ω -3/ ω -6 – не выше 2:1–3:1 [20]

Результаты исследований последних лет добавили новые данные в механизм действия этих соединений. Выявлено, что кислоты семейства ω -6 способны запускать болевые реакции, аллергию, процессы воспаления и повышение давления в сосудах, в то время как кислоты ряда ω -3 способствуют остановке этих процессов. Поэтому в качестве оптимального предлагается соотношение ω -3/ ω -6 1:1 [2–4, 11, 15, 16].

Основное значение для физиологических и биохимических процессов рыб имеют главным образом длинноцепочечные ПНЖК – арахидоновая (эйкозатетраеновая) кислота (20:4 ω -6, АРК), эйкозапентаеновая (20:5 ω -3, ЭПК) и докозагексаеновая (22:6 ω -3, ДГК). Результаты исследований показывают, что присутствие в корме ПНЖК способствует наличию этих кислот в мышцах. Таким образом, форель, выращиваемая в р. Ангаре, является прекрасным источником ЭПК и ДГК из семейства ω -3.

Особь *Parasalmo mykiss*, отобранные для исследования, содержались в садках при температуре воды от +12 до +15 °С в течение 10 мес. Оценка темпа роста радужной форели, который зависит от температуры воды, степени насыщения воды растворенным кислородом и полноценности применяемых кормов, была проведена на 30 особях, средний прирост которых составил 600 ± 50 г. Такое значение прироста рыб характерно для предприятия ООО НПО «Иркутская форель».

Рыбий жир является одним из известных лечебных натуральных жиров, где ЭПК и ДГК жирные кислоты обнаруживаются в значительных количествах. Преобладающей ω -3 жирной кислотой в мышцах форели была С22:6 ω -3 (докозагексаеновая кислота), как и у большинства пресноводных рыб. Среди группы ω -6 92 % составляла 18:2 ω -6 – эссенциальная линолевая кислота, предшественник ЭПК.

Важной особенностью состава ЖК исследованных образцов форели был уровень ненасыщенности липидов за счет содержания полиненасыщенной докозагексаеновой кислоты. Содержание длинноцепочечных высоконепредельных жирных кислот (эйкозапентаеновой 20:5 ω -3 и докозагексаеновой 22:6 ω -3) в мышцах рыб оказалось достаточно высоким при кормлении кормом Арpens GROWER EF. Так, у всех исследованных особей содержание эйкозапентаеновой кислоты 20:5 ω -3 находилось в пределах 2,4–3,2 %, а содержание докозагексаеновой кислоты колебалось от 9,5 до 13,5 % от общей суммы ЖК, т. е. при благоприятном температурном режиме уровень ПНЖК был достаточно высоким у рыб, получавших используемый корм. В условиях характерных для региона температур в р. Ангаре содержание эссенциальных кислот в мышцах форели сохраняется на оптимальном уровне. Определенные сочетания корма и температуры предохраняют организм рыб от потери ЭПК и ДГК.

Несмотря на то, что имеется много данных о жирнокислотном составе радужной форели, эти исследования необходимо продолжать, выявляя связь жирнокислотного состава корма и условий содержания аквакультуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании были получены данные о пуле жирных кислот в белых мышцах особей *Parasalmo mykiss*, содержащихся в садках прибрежной пелагиали р. Ангары, что позволяет оценить перспективы получения аквакультуры радужной форели с качественным мясом в условиях Восточной Сибири.

Кормам для рыб, содержащихся в искусственных условиях, необходимо уделять особое внимание, так как рыбы в зависимости от возраста по-разному реагируют на уровень липидов в кормах. Содержание жирных кислот в белых мышцах исследованных особей форели позволило охарактеризовать используемый состав корма как оптимальный для нормального роста и развития рыб.

У всех исследованных особей в белых мышцах выявлены близкие уровни и соотношение ЖК. Отмечено высокое содержание ПНЖК в мышцах с преобладанием физиологически значимой докозагексаеновой 22:6 ω -3 кислоты.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки качества продукции садковой аквакультуры радужной форели с учетом особенностей водоемов Восточной Сибири и сбалансированных комбикормов фабричного производства для лососевых рыб. Результаты проведенных исследований могут быть использованы для разработки практических рекомендаций при составлении научного обоснования условий выращивания садковых аквакультур радужной форели в сибирских водоемах.

Работа выполнена на базе уникальной научной установки «Экспериментальный пресноводный аквариумный комплекс байкальских гидробионтов» ЛИН СО РАН и «Приборного центра коллективного пользования физико-химического ультрамикрoанализа ЛИН СО РАН (ЦКП «Ультрамикрoанализ») по теме №0279-2021-0005 «Исследование трансформаций состояния водоемов и водотоков Восточной Сибири в сезонных и долговременных аспектах в контексте изменений климата, геологической среды и антропогенных нагрузок».

Список источников

1. Влияние повышенной температуры на физиологическое состояние сиговых рыб (Coregonidae) при выращивании их в условиях аквакультуры / И. Н. Остроумова, В. В. Костюничев, А. А. Лютиков [и др.]. – DOI: 10.37663/0131-6184-2022-1-69-74 // Аквакультура и воспроизводство. Рыбное хозяйство. – 2022. – №1. – С. 69–74.
2. Оценка липидных показателей комбикормов для аквакультуры радужной форели в процессе хранения / Н. Н. Немова, О. Б. Васильева, Т. Р. Руоколайнен [и др.] // Кормопроизводство. – 2011. – № 3. – С. 44–47.
3. Fish oil replacement in rainbow trout diets and total dietary PUFA content: II) Effects on fatty acid metabolism and in vivo fatty acid bioconversion / T. Thanuthong, D. Francis, E. Manickam [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.09.026 // Aquaculture. – 2011. – Vol. 322–323. – P 99–108.
4. Гладышев, М. И. Наземные источники полиненасыщенных жирных кислот для аквакультуры / М. И. Гладышев – DOI: 10.31857/S0042875221030048 // Вопросы ихтиологии. – 2021. – Т. 61. – № 4. – С. 471–485.
5. Шатуновский, М. И. Экологические закономерности обмена веществ морских рыб / М. И. Шатуновский. – Москва: Наука, 1980. – 288 с. – ISBN 978-5-8114-3341-4.

6. Особенности влияния гуминовых кислот на аквакультуру / Е. Ю. Закирова, А. М. Аймалетдинов, М. Н. Мансурова, Маланьева А. Г. – DOI: 10.36038/0131-6184-2025-4-120-128 // Рыбное хозяйство. – 2025. – Т. 1. – №. 4. – С. 120–128.
7. The biochemical ecology of marine fishes / Y. V. Natchin, M. V. Savina, G. E. Shulman, R. M. Love. – DOI: 10.1023/A:1012639928289 // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. – 2001. – Vol. 36. – P. 317–318.
8. Lloret, J. Condition and health indicators of exploited marine fishes / J. Lloret, G. E Shulman, R. M. Love. – Oxford: Wiley Blackwell, 2014. – 262 p. – ISBN 978-0-470-67024-8.
9. Болтачев, А. Р. Аналитический обзор современного состояния мирового рыболовства и аквакультуры / А. Р. Болтачев // Морской экологический журнал. – 2007. – Т. 6. – № 4. – С. 5–17.
10. Differences in composition and fatty acid contents of different rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) strains in similar and contrasting rearing conditions / M. I. Gladyshev, A. A. Makhrov, A. N. Sushchik [et al.] – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738265 // Aquaculture. – 2022. – Vol. 556. – P. 738265.
11. Влияние комбикормов различного состава на ростовые процессы радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / О. Б. Васильева, М. А. Назарова, П. О. Рипатти, Н. Н. Немова. – DOI: 10.17076/eb245. // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. – 2015. – № 11. – С. 99–108.
12. Sargent, J. R. The lipids / J. R. Sargent, D. R Tocher, J. G. Bell. – DOI: 10.1016/b978-012319652-1/50005-7. – Text: electronic // San Diego: Academic Press, 2002. – Chap. 4. Fish Nutrition. – P. 181–257. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/b978-012319652-1/50005-7?ysclid=mfc5q9sx710459424> (date of treatment: 29.08.2025).
13. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and antioxidant parameters of juvenile mud crab (*Scylla paramamosain*) / J. Zhao, X. B. Wen, S. K. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.09.018 // Aquaculture. – 2015. – Vol. 435. – P. 200–206.
14. Скларов, В. Я. Корма и кормление рыб в аквакультуре / В. Я. Скларов. – Москва: Изд-во ВНИРО, 2008. – 150 с. – ISBN 978-5-85382-357-0.
15. Васильева, О.Б. Ассимиляция экзогенных жирных кислот в тканях радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) в аквакультуре / О. Б. Васильева, М. А. Назарова, Н. Н. Немова. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-1-98-104 // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. – 2023. – № 1. – С. 98–104.
16. Назарова, М. А. Сезонные изменения липидного состава тканей радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / М. А. Назарова, О. Б. Васильева, Н. Н. Немова – Текст: электронный // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2017. – № 6 (167). – С. 12-20. – URL: <http://elibrary.petrso.ru/books/29859> (дата обращения: 29.08.2025).
17. Hochachka, P. W. Biochemical adaptation Mechanism and process in physiological evolution / P. W. Hochachka, G. N. Somero // New York: Oxford University Press, 2002. – 466 p.
18. Correlates of perceptual distortions in clinical and non-clinical populations using the Cardiff Anomalous Perceptions Scale (CAPS): associations with anxiety and depression and a revalidation using a representative population sample / V. Bell,

P. W. Halligan, K. Pugh [et al.]. – DOI: 10.1016/j.psychres.2011.05.025 // *Psychiatry Res.* – 2011. – Vol. 189 (3). – P. 451–457.

19. МР 2.3.1.2432-08. 2.3.1. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации (утв. Роспотребнадзором 18.12.2008).

20. МР 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Гигиена питания. Рациональное питание. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации. Методические рекомендации (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.07.2021).

References

1. The effect of increased temperature on physiological state of whitefish cultivated in aquaculture / I. N. Ostroumova, V. V. Kostyunichev, A. A. Lyutikov [et al.]. – DOI: 10.37663/0131-6184-2022-1-69-74 // *Fisheries.* – 2022. – Vol. 1. – P. 69–74.

2. Evaluation of lipid parameters of compound feeds for rainbow trout aquaculture during storage / N. N. Nemova, O. B. Vasilyeva, T. R. Ruokolainen [et al.] // *Feed production.* – 2011. – № 3. – P. 44–47.

3. Fish oil replacement in rainbow trout diets and total dietary PUFA content: II) Effects on fatty acid metabolism and in vivo fatty acid bioconversion / T. Thanuthong, D. Francis, E. Manickam [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2011.09.026 // *Aquaculture.* – 2011. – Vol. 322–323. – P. 99–108.

4. Gladyshev, M. I. Land-based sources of polyunsaturated fatty acids for aquaculture / M. I. Gladyshev. – DOI: 10.31857/S0042875221030048 // *Questions of Ichthyology.* – 2021. – Vol. 61. – № 4. – P. 471–485.

5. Shatunovsky, M. I. Ecological patterns of metabolism of marine fish / M. I. Shatunovsky. – Moscow: Nauka, 1980. – 288 p. – ISBN 978-5-8114-3341-4.

6. Features of the influence of humic acids to aquaculture / E. Yu. Zakirova, A. M. Aimaletdinov, M. N. Mansurova, A. G. Malanyeva. – DOI: 10.36038/0131-6184-2025-4-120-128 // *Fisheries.* – 2025. – Vol. 1 (4). – P. 120–128.

7. Biochemical ecology of marine fishes / Y. V. Natochin, M. V. Savina, G. E. Shulman, R. M. Love. – DOI: 10.1023/A:1012639928289 // *Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology.* – 2001. – Vol. 36. – P. 317–318.

8. Lloret, J. Condition and health indicators of exploited marine fishes / J. Lloret, G. E. Shulman, R. M. Love. – Oxford: Wiley Blackwell, 2014. – 262 p. – ISBN 978-0-470-67024-8.

9. Boltachev, A. R. Analytical review of the current state of world fisheries and aquaculture / A. R. Boltachev // *Marine Ecological Journal.* – 2007. – Vol. 6. – № 4. – P. 5–17.

10. Differences in composition and fatty acid contents of different rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) strains in similar and contrasting rearing conditions / M. I. Gladyshev, A. A. Makhrov, A. N. Sushchik [et al.] – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2022.738265 // *Aquaculture.* – 2022. – Vol. 556. – P. 738265.

11. Effect of mixed feeds of different composition on growth processes of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / O. B. Vasil'eva, M. A. Nazarova,

P. O. Ripatti, N. N. Nemova. – DOI: 10.17076/eb245 // Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – № 11. – P. 99–108.

12. Sargent, J. R. The lipids / J. R. Sargent, D. R. Tocher, J. G. Bell. – DOI: 10.1016/b978-012319652-1/50005-7. – Text: electronic // San Diego: Academic Press, 2002. – Chap. 4. Fish Nutrition. – P. 181–257. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/b978-012319652-1/50005-7?ysclid=mfc5q9sx710459424> (date of treatment: 29.08.2025).

13. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and antioxidant parameters of juvenile mud crab (*Scylla paramamosain*) / J. Zhao, X. B. Wen, S. K. Li [et al.]. – DOI: 10.1016/j.aquaculture.2014.09.018 // Aquaculture. – 2015. – Vol. 435. – P. 200–206.

14. Sklyarov, V. Ya. Feed and feeding of fish in aquaculture / V. Ya. Sklyarov. – Moscow: VNIRO Publishing House, 2008. – 150 p. – ISBN 978-5-85382-357-0.

15. Vasil'eva, O. B. Assimilation of exogenous fatty acids in tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) in aquaculture. / O. B. Vasil'eva, M. A. Nazarova, N. N. Nemova. – DOI: 10.24143/2073-5529-2023-1-98-104 // Vestnik of Astrakhan State Technical University. – 2023. – Vol. 1. – P. 98–104.

16. Nazarova, M. A. Seasonal changes in the lipid composition of tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) / M. A. Nazarova, O. B. Vasil'eva, N. N. Nemova. – Text: electronic // Scientific notes of Petrozavodsk State University. – 2017. – № 6 (167). – P. 12–20. – URL: <http://elibrary.petsu.ru/books/29859> (date of treatment: 29.08.2025)

17. Hochachka, P. W. Biochemical adaptation Mechanism and process in physiological evolution / P. W. Hochachka, G. N. Somero // New York: Oxford University Press, 2002. – 466 p.

18. Correlates of perceptual distortions in clinical and non-clinical populations using the Cardiff Anomalous Perceptions Scale (CAPS): associations with anxiety and depression and a revalidation using a representative population sample / V. Bell, P. W. Halligan, K. Pugh [et al.]. – DOI: 10.1016/j.psychres.2011.05.025 // Psychiatry Res. – 2011. – Vol. 189 (3). – P. 451–457.

19. MR 2.3.1.2432-08. 2.3.1. Rational nutrition. Standards of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation. Guidelines (approved by Rospotrebnadzor on 18.12.2008).

20. MR 2.3.1.0253-21. 2.3.1. Nutrition hygiene. Rational nutrition. Standards of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation. Guidelines (approved by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 22.07.2021).

Информация об авторах

Г. А. Федорова – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории хроматографии

А. А. Никонова – кандидат химических наук, главный специалист лаборатории хроматографии

О. А. Белых – доктор биологических наук, профессор кафедры химии

О. Ю. Глызина – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, руководитель группы экспериментальной гидробиологии

Information about the authors

G. A. Fedorova – Candidate of Chemistry, Senior Researcher of the Chromatography Laboratory

A. A. Nikonova – Candidate of Chemistry, Chief Specialist of the Chromatography Laboratory

O. A. Belykh – Doctor of Biology, Professor of the Department of Chemistry

O. Yu. Glyzina – Candidate of Biology, Senior Researcher, experimental team leader hydrobiology

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article

The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 30.09.2025; одобрена после рецензирования 10.10.2025; принята к публикации 15.10.2025.

The article was submitted 30.09.2025; approved after reviewing 10.10.2025; accepted for publication 15.10.2025.