

ФИЗИОЛОГИЯ И БИОХИМИЯ ГИДРОБИОНТОВ

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF HYDROCOLE

Научная статья

УДК 577.115.3:639.3.043.14

<https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-98-104>

EDN DKZZPQ

Ассимиляция экзогенных жирных кислот в тканях радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) в аквакультуре

Ольга Борисовна Васильева^{1✉},
Марина Александровна Назарова², Нина Николаевна Немова³

^{1, 3}Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук,
Петрозаводск, Россия, olga_4428@mail.ru

²Вологодский государственный университет,
Вологда, Россия

Аннотация. Проведено сравнительное исследование состава жирных кислот в корме и пищевом комке из прямой кишки, а также мышцах и внутреннем жире у радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), выращенной на различных комбикормах, в июне и сентябре. Установлены различия жирнокислотного состава комбикормов: в корме № 1 преобладали мононенасыщенные жирные кислоты, а в корме № 2 выявлен значительно более высокий уровень насыщенных и $\omega 3$ полиненасыщенных жирных кислот. Количество $\omega 6$ полиненасыщенных жирных кислот в кормах было одинаково. Несмотря на различия в жирнокислотном составе кормов снижение количества жирных кислот в кишечнике для двух групп рыб было одинаково и не зависело от месяца исследования. Лучше всего у радужной форели усваивались полиненасыщенные жирные кислоты. Мононенасыщенные жирные кислоты показали низкий уровень ассимиляции, достоверных различий в содержании насыщенных жирных кислот пищевого комка из прямой кишки и корма не установлено. Мононенасыщенные жирные кислоты доминировали в мышцах и внутреннем жире радужной форели по сравнению с другими жирными кислотами. В июне в мышцах форели группы № 2, выращенной на корме № 2 увеличивалось количество $\omega 3$ полиненасыщенных жирных кислот ($143,9 \pm 8,9$ мг/г липида), а концентрация мононенасыщенных жирных кислот возрастала во внутреннем жире рыб группы № 1 ($310,8 \pm 10,8$ мг/г липида), что соответствовало преобладанию данных классов жирных кислот в кормах, которыми питались рыбы. К окончанию эксперимента в тканях двух групп рыб увеличивалась концентрация моно- и полиненасыщенных жирных кислот. Мононенасыщенные жирные кислоты преимущественно запасались во внутреннем жире форели, а полиненасыщенные жирные кислоты депонировались в мышцах рыб.

Ключевые слова: аквакультура, лососевые рыбы, радужная форель, комбикорм, жирные кислоты, внутренний жир, мышечная ткань

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке ГЗ КарНЦ РАН FMEN-2022-0006 (№ г. р. 122032100052-8).

Для цитирования: Васильева О. Б., Назарова М. А., Немова Н. Н. Ассимиляция экзогенных жирных кислот в тканях радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) в аквакультуре // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2023. № 1. С. 98–104. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-98-104>. EDN DKZZPQ.

Original article

Assimilation of exogenous fatty acids in tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) in aquaculture

Olga B. Vasil'eva^{1✉}, Marina A. Nazarova², Nina N. Nemova³

^{1,3}Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia, olga_4428@mail.ru[✉]

²Vologda State University,
Vologda, Russia

Abstract. A comparative study of the fatty acids composition in the feed and food lump from the rectum, and in muscles and internal fat of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) grown on various diets in June and September was carried out. Differences in content of dietary fatty acids in diet 1 and diet 2 were found. Monounsaturated fatty acids predominated in diet No. 1. A significantly higher level of saturated and ω 3 polyunsaturated fatty acids in diet No. 2 was recorded. Concentration of ω 6 polyunsaturated fatty acids in diets was equal. Despite the differences in the fatty acid composition of the diet, a decreased concentration of fatty acids in the intestines for the two groups of fish was similar and did not depend on the month of the study. Polyunsaturated fatty acids were absorbed more effectively in rainbow trout. Monounsaturated fatty acids showed a low level of assimilation. Significant differences in the content of saturated fatty acids in the food lump from the rectum and in feed was not stated. Monounsaturated fatty acids dominated in muscles and visceral fat of rainbow trout compared to other fatty acids. In June concentration of ω 3 polyunsaturated fatty acids increased in the muscles of trout species of group No. 2 (143.9 ± 8.9 mg/g lipids), while concentration of monounsaturated fatty acids increased in the internal fat of the fish of group No. 1 (310.8 ± 10.8 mg/g lipids). This fact corresponded to the predominance of these classes of fatty acids in the feed of the fish. Concentration of mono- and polyunsaturated fatty acids in the tissues of the two groups of the fish increased by the end of the experiment. Monounsaturated fatty acids were mainly stored in the internal fat of trout, while polyunsaturated fatty acids were deposited in the muscles of the fish.

Keywords: aquaculture, Salmonid fish, rainbow trout, compound feed, fatty acids, internal fat, muscle tissue

Acknowledgments: the study was carried out under financial support of the state order of the Karelian Research Centre of RAS FMEN-2022-0006 (Project № 122032100052-8).

For citation: Vasil'eva O. B., Nazarova M. A., Nemova N. N. Assimilation of exogenous fatty acids in tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) in aquaculture. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry.* 2023;1:98-104. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2023-1-98-104>. EDN DKZZPQ.

Введение

Одним из определяющих факторов успешного развития аквакультуры является научно обоснованное и рентабельное кормопроизводство. При составлении рецептур кормов, помимо стоимости и технологии обработки кормового сырья, необходимо учитывать видовые, возрастные, сезонные и другие аспекты в питании рыб, особенно степень ассимиляции пищевых нутриентов. Изучение переваривания и усвояемости питательных веществ у объектов аквакультуры является первым шагом в выборе источников ингредиентов при производстве комбикормов.

Экзогенные липиды, в том числе жирные кислоты, входящие в их состав, имеют важное значение в питании рыб. Жирные кислоты являются структурными компонентами почти всех форм липидов, играя ключевую роль в функционировании биологических мембран [1]. Жирные кислоты служат основным источником энергии для жизнедеятельности рыб, а поступление незаменимых жирных кис-

лот в необходимых концентрациях имеет решающее значение для быстрого роста молоди [2]. Согласно многочисленным сообщениям, жирные кислоты участвуют в транспорте жирорастворимых витаминов, функционируют как предшественники эйкозаноидов и гормонов у рыб [3]. Доступность экзогенных жирных кислот в питании рыб влияет на такие процессы, как репродукция, осморегуляция и реакция на стресс [4]. Кроме того, липиды и жирные кислоты, поступающие с пищей, являются наиболее важными факторами иммунного ответа и устойчивости рыб к болезням [5].

В настоящее время активно изучаются механизмы переваривания и всасывания жирных кислот у лососевых рыб в аквакультуре [6], однако вопрос о степени усвояемости жирных кислот и их последующего распределения и накопления в тканях рыб до сих пор слабо исследован. Данная работа направлена на выявление особенностей ассимиляции экзогенных жирных кислот в тканях ра-

дужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), выращенной на кормах разного состава.

Материалы и методы

Проведено исследование радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), выращенной в садках на оз. Ладожском в Республике Карелия (61°58'90'' с.ш., 31°21'79'' в.д.). В зимний период форель возраста 1+ содержалась на корме № 1,

отличавшемся от корма № 2 количеством некоторых жирных кислот. После схода льда в начале мая рыбу поместили в два садка, расположенных рядом (группа № 1 и группа № 2). Группу рыб № 1 продолжили кормить кормом № 1, а форель из группы № 2 перевели на корм № 2. Отбор проб осуществляли в июне и сентябре. Описание основных характеристик объекта исследования и условий выращивания рыб представлено в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Характеристика условий выращивания и линейно-весовых параметров форели

Characteristics of trout growing conditions and linear-weight parameters

Показатель	Месяц исследования			
	Июнь		Сентябрь	
Группа рыб	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Выборка рыб, <i>n</i>	12			
Корм	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
Количество кормлений в день	2			
Температура воды, °С	12,3		13,1	
Длина рыб, см	13,5 ± 1,7	14,6 ± 1,9	18,4 ± 2,6 ¹	24,4 ± 2,1 ^{2,3}
Масса рыб, г	25,7 ± 2,5	27,7 ± 2,2	77,5 ± 5,4 ¹	121,4 ± 4,7 ^{2,3}

1 – различия между группами рыб № 1 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 2 – различия между рыбами группы № 1 и 2 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 3 – различия между группами рыб № 2 и различия между рыбами группы № 2 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$.

Проведен количественный анализ жирных кислот и сумм отдельных групп – насыщенные, мононенасыщенные, полиненасыщенные кислоты, в том числе по семействам $\omega 3$ и $\omega 6$, в комбикормах, пищевом комке из прямой кишки, внутреннем жире и мышцах рыб. Фиксирование образцов для исследования осуществляли смесью хлороформа с метанолом, в соотношении по объему 2 : 1 (смесь Фолча). Пробоподготовка жирнокислотного анализа включала выделение общих липидов и их прямое метилирование [7]. Разделение метиловых эфиров жирных кислот проводили методом газо-жидкостной хроматографии на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5 000». Идентификацию жирных кислот выполняли сопоставлением времени выхода пиков исследуемой пробы и маркеров, содержание жирных кислот оценивали при использовании компьютерной программы «Хроматэк Аналитик 3» (ЗАО СКБ «Хроматек», Йошкар-Ола). Данные обрабатывали статистически, сравнение двух выборок проводили с применением критерия Вилкоксона – Манна – Уитни ($p \leq 0,05$).

Данная работа проведена на оборудовании Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Результаты и обсуждение

В составе экзогенных липидов в организм рыб поступают насыщенные (НЖК), мононенасыщенные (МНЖК) и полиненасыщенные (ПНЖК) жирные кислоты. Среди насыщенных жирных кислот у рыб доминируют пальмитиновая (16 : 0) и стеариновая (18 : 0) кислоты. Основными представителями МНЖК являются пальмитолеиновая (16 : 1 ω 7) и олеиновая (18 : 1 ω 9) кислоты. Сумму ПНЖК преимущественно составляют жирные кислоты $\omega 3$ и $\omega 6$ семейств, где линоленовая (18 : 3 ω 3) и линолевая (18 : 2 ω 6) кислоты относятся к эссенциальным. В данной работе был исследован жирнокислотный состав кормов от двух различных производителей (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Жиринокислотный состав корма и пищевого комка из прямой кишки форели, мг/г липида

Fatty acid composition of feed and food lump from trout rectum, mg/g lipid

Жириные кислоты	Корм 1	Корм 2	Содержимое терминальной части кишечника			
			Июнь		Сентябрь	
			Группа 1	Группа 2	Группа 1	Группа 2
14 : 0	9,3 ± 1,4	18,4 ± 2,2 ¹	7,4 ± 1,5	16,2 ± 2,3 ²	7,2 ± 1,7	16,3 ± 2,2 ²
16 : 0	112,5 ± 7,1	152,1 ± 9,6 ¹	96,8 ± 10,3	134,7 ± 11,2 ²	97,4 ± 10,6	131,6 ± 11,6 ²
18 : 0	76,2 ± 4,3	67,7 ± 4,1 ¹	70,9 ± 5,2	63,2 ± 4,6	69,8 ± 5,3	64,2 ± 4,9
Σ НЖК	220,0 ± 16,4	261,7 ± 15,4 ¹	194,6 ± 19,1	235,3 ± 20,5 ²	193,8 ± 18,7	234,6 ± 20,0 ²
16 : 1ω7	38,2 ± 4,4	37,7 ± 3,6	20,2 ± 3,9 ³	21,1 ± 4,1 ³	19,9 ± 2,8 ³	20,6 ± 3,0 ³
18 : 1ω9	114,6 ± 10,7	89,7 ± 8,1 ¹	76,8 ± 9,7 ³	53,1 ± 8,3 ^{2,3}	75,8 ± 9,4 ³	54,3 ± 8,5 ^{2,3}
Σ МНЖК	231,3 ± 22,1	176,4 ± 20,6 ¹	161,1 ± 19,6 ³	112,7 ± 17,3 ^{2,3}	160,6 ± 20,6 ³	111,7 ± 18,1 ^{2,3}
18 : 2ω6	36,16 ± 6,4	39,0 ± 5,1	17,8 ± 5,2 ³	19,1 ± 4,7 ³	18,2 ± 4,9 ³	18,9 ± 5,0 ³
20 : 4ω6	8,5 ± 0,7	9,3 ± 0,7	4,1 ± 1,2 ³	4,8 ± 1,1 ³	4,2 ± 1,3 ³	4,5 ± 1,1 ³
Σ ω6 ПНЖК	63,9 ± 8,8	66,8 ± 7,8	32,4 ± 7,2 ³	32,0 ± 6,7 ³	34,1 ± 6,9 ³	31,4 ± 7,2 ³
18 : 3ω3	12,1 ± 2,1	19,9 ± 1,9 ¹	4,2 ± 0,7 ³	8,6 ± 1,2 ^{2,3}	4,8 ± 0,9 ³	8,3 ± 1,5 ^{2,3}
20 : 5ω3	31,1 ± 3,7	43,4 ± 6,1 ¹	12,4 ± 2,2 ³	18,1 ± 2,9 ^{2,3}	11,7 ± 2,0 ³	17,4 ± 2,5 ^{2,3}
22 : 6ω3	74,7 ± 7,1	100,4 ± 10,8 ¹	28,8 ± 4,3 ³	44,8 ± 5,6 ^{2,3}	29,0 ± 4,6 ³	43,7 ± 5,4 ^{2,3}
Σ ω3 ПНЖК	164,0 ± 13,5	208,7 ± 15,4 ¹	55,1 ± 9,1 ³	87,4 ± 10,1 ^{2,3}	54,8 ± 9,4 ³	86,0 ± 9,9 ^{2,3}
Σ ПНЖК	240,7 ± 17,4	291,2 ± 20,6 ¹	92,6 ± 9,7 ³	121,2 ± 12,6 ^{2,3}	93,2 ± 11,4 ³	123,7 ± 11,1 ^{2,3}

1 – различия между комбикормами № 1 и 2, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 2 – различия между группами рыб № 1 и 2, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 3 – различия между показателями в корме и пищевом комке, статистически значимые при $p \leq 0,05$.

При сравнительном анализе состава жирных кислот кормов № 1 и 2 были выявлены различия в содержании НЖК, которое было выше в корме № 2. Напротив, МНЖК преобладали в корме № 1. Уровень ПНЖК превалировал в корме № 2, поскольку в данном корме ω3 ПНЖК значительно преобладали (см. табл. 2).

Количество ω6 ПНЖК в исследуемых кормах было одинаковым.

Сложные липиды пищи, содержащие жирные кислоты, в желудочно-кишечном тракте рыб гидролизуются липазами до более простых веществ, которые у радужной форели обладают разной степенью усвояемости. Пищеварительные липазы у рыб характеризуются несколькими вариантами специфичности [8], причем, в отличие от млекопитающих, у которых переваривание происходит главным образом в передней части кишечника, некоторые костистые рыбы могут секретировать липазу слизистой оболочкой кишечника, которая функционирует в любом его отделе [9]. Таким образом, всасывание продуктов гидролиза пищевых липидов, в том числе и жирных кислот, у форели возможно на протяжении всего кишечного тракта.

Уровень ассимиляции жирных кислот у рыб можно выявить различными способами, одним из которых является оценка изменения концентрации жирных кислот до и после переваривания пищи, что и было проведено в данном исследовании. Установлены более низкие значения содержания всех исследованных жирных кислот в пищевом комке из прямой кишки рыб по сравнению с кормом, за исключением НЖК (см. табл. 2). Насыщенные жирные кислоты активно синтезируются в организме рыб [1], с чем, возможно, и связана крайне низкая степень их ассимиляции. Обнаружено снижение концентрации МНЖК в содержимом терминальной части кишечника по сравнению с кормом (см. табл. 2). Также показан высокий уровень ассимиляции для ПНЖК, где для разных семейств ПНЖК установлено уменьшение данных ЖК в 2–3 раза (см. табл. 2). В основном ПНЖК в организме рыб имеют экзогенное происхождение. Однако у пресноводных рыб, к которым относится и объект данного исследования, возможна трансформация (элонгация и десатурация) эссенциальных линоленовой и линолевой кислот до длинноцепочечных жирных кислот с 4–6 двойными связями [2]. Собственный синтез физиологически значимых длинноцепочечных ПНЖК – эйкозапентаеновой (20 : 5ω3) (ЭПК), докозагексаеновой (22 : 6ω3) (ДГК) и арахидоновой (20 : 4ω6) кислот – зачастую недостаточен для нормальной жизнедеятельности рыб и должен восполняться поступлением этих жирных кислот в составе пищи [10], что, вероятно, и обуславливает высокую степень их ассимиляции у форели. Полученные нами данные согласуются с ранее проведенными исследованиями, где было показано, что у рыб при переваривании липидов ПНЖК более эффективно усваиваются, чем НЖК и МНЖК [8]. Следует отметить, что снижение содержания жирных кислот при переваривании было одинаковым для 1-й и 2-й групп рыб, несмотря на разницу концентраций жирных кислот в кормах. Также не было показано различий в степени усвояемости жирных кислот в зависимости от месяца исследования.

лоты активно синтезируются в организме рыб [1], с чем, возможно, и связана крайне низкая степень их ассимиляции. Обнаружено снижение концентрации МНЖК в содержимом терминальной части кишечника по сравнению с кормом (см. табл. 2). Также показан высокий уровень ассимиляции для ПНЖК, где для разных семейств ПНЖК установлено уменьшение данных ЖК в 2–3 раза (см. табл. 2). В основном ПНЖК в организме рыб имеют экзогенное происхождение. Однако у пресноводных рыб, к которым относится и объект данного исследования, возможна трансформация (элонгация и десатурация) эссенциальных линоленовой и линолевой кислот до длинноцепочечных жирных кислот с 4–6 двойными связями [2]. Собственный синтез физиологически значимых длинноцепочечных ПНЖК – эйкозапентаеновой (20 : 5ω3) (ЭПК), докозагексаеновой (22 : 6ω3) (ДГК) и арахидоновой (20 : 4ω6) кислот – зачастую недостаточен для нормальной жизнедеятельности рыб и должен восполняться поступлением этих жирных кислот в составе пищи [10], что, вероятно, и обуславливает высокую степень их ассимиляции у форели. Полученные нами данные согласуются с ранее проведенными исследованиями, где было показано, что у рыб при переваривании липидов ПНЖК более эффективно усваиваются, чем НЖК и МНЖК [8]. Следует отметить, что снижение содержания жирных кислот при переваривании было одинаковым для 1-й и 2-й групп рыб, несмотря на разницу концентраций жирных кислот в кормах. Также не было показано различий в степени усвояемости жирных кислот в зависимости от месяца исследования.

После всасывания экзогенные жирные кислоты преимущественно поступают в печень рыб, где активно метаболизируются и затем уже реализуются в пластическом и энергетическом обменах или распределяются в депонирующих органах [1]. Мышцы и внутренний жир являются основными тканями для запасания липидов у лососевых рыб [2], чем и был обусловлен выбор объекта исследования в данной работе. В организме животных, в том числе и рыб, ПНЖК в основном входят в состав фосфо-

липидов, которые формируют биологические мембраны, а НЖК и МНЖК – в состав триацилглицеринов (ТАГ), используемых в качестве источников энергии. Мононенасыщенные жирные кислоты в мышцах и внутреннем жире форели преобладали по сравнению с другими жирными кислотами (за исключением мышц у форели группы № 2 в сентябре) (табл. 3, 4), что указывало на высокий уровень ТАГ в данных тканях.

Таблица 3

Table 3

Жирнокислотный состав мышц форели, мг/г липида
Fatty acid composition of trout muscles, mg/g lipid

Жирные кислоты	Июнь		Сентябрь	
	Группа 1	Группа 2	Группа 1	Группа 2
14 : 0	9,8 ± 2,9	8,9 ± 2,3	11,2 ± 2,4	10,1 ± 3,0
16 : 0	77,0 ± 7,6	79,0 ± 8,9	80,6 ± 8,1	82,4 ± 10,8
18 : 0	57,8 ± 5,7	59,1 ± 6,1	66,8 ± 4,7	67,4 ± 7,1
Σ НЖК	161,0 ± 10,6	163,7 ± 9,8	176,6 ± 7,3	179,2 ± 9,4
16 : 1ω7	36,2 ± 4,5	35,8 ± 4,5	45,4 ± 4,1 ²	44,8 ± 4,2 ³
18 : 1ω9	128,2 ± 8,0	122,2 ± 6,9	151,2 ± 6,2 ²	137,4 ± 7,3 ^{1, 3}
Σ МНЖК	222,1 ± 16,7	204,6 ± 13,7	282,0 ± 13,7 ²	232,4 ± 13,0 ^{1, 3}
18 : 2ω6	43,3 ± 2,5	40,2 ± 2,4	54,7 ± 3,7 ²	53,8 ± 3,6 ³
20 : 4ω6	6,4 ± 1,2	5,9 ± 1,2	18,7 ± 1,6 ²	16,2 ± 1,2 ²
Σ ω6 ПНЖК	52,8 ± 6,7	49,7 ± 5,3	74,6 ± 7,5 ²	73,4 ± 9,0 ³
18 : 3ω3	8,4 ± 1,2	15,7 ± 1,2 ¹	11,9 ± 1,9 ²	22,4 ± 5,4 ^{1, 3}
20 : 5ω3	39,7 ± 2,4	46,3 ± 2,7 ¹	49,3 ± 3,7 ²	69,6 ± 7,2 ^{1, 3}
22 : 6ω3	54,0 ± 3,5	63,9 ± 4,9 ¹	72,2 ± 6,2 ²	93,6 ± 8,6 ^{1, 3}
Σ ω3 ПНЖК	124,5 ± 7,4	143,9 ± 8,9 ¹	165,1 ± 8,7 ²	215,6 ± 14,4 ^{1, 3}
Σ ПНЖК	183,3 ± 7,9	200,7 ± 8,6 ¹	247,8 ± 7,5 ²	292,4 ± 13,8 ^{1, 3}

1 – различия между группами рыб № 1 и 2, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 2 – различия между рыбами группы № 1 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 3 – различия между рыбами группы № 2 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$.

Таблица 4

Table 4

Жирнокислотный состав внутреннего жира форели, мг/г липида
Fatty acid composition of trout internal fat, mg/g lipid

Жирные кислоты	Июнь		Сентябрь	
	Группа 1	Группа 2	Группа 1	Группа 2
14 : 0	13,9 ± 4,9	15,6 ± 5,8	16,9 ± 6,6	18,7 ± 4,2 ²
16 : 0	116,0 ± 9,8	122,6 ± 8,3	135,4 ± 16,5	144,1 ± 9,5 ³
18 : 0	62,7 ± 6,3	65,8 ± 6,7	76,1 ± 7,1	85,4 ± 8,9 ³
Σ НЖК	218,1 ± 17,2	228,0 ± 10,6	251,3 ± 19,6	276,6 ± 13,2 ³
16 : 1ω7	52,0 ± 6,0	47,8 ± 5,7	72,3 ± 9,9	65,3 ± 7,5
18 : 1ω9	183,0 ± 10,3	152,0 ± 9,1 ¹	268,8 ± 18,1 ²	206,6 ± 11,7 ^{1, 3}
Σ МНЖК	310,8 ± 10,8	273,4 ± 12,3 ¹	450,3 ± 20,7 ²	377,6 ± 15,8 ^{1, 3}
18 : 2ω6	48,2 ± 3,3	50,2 ± 3,3	55,2 ± 4,1	56,8 ± 5,0
20 : 4ω6	7,5 ± 1,6	7,7 ± 1,6	8,3 ± 0,8	8,5 ± 1,7
Σ ω6 ПНЖК	58,0 ± 7,4	59,8 ± 9,1	65,2 ± 8,3	66,5 ± 10,0
18 : 3ω3	14,8 ± 3,3	16,2 ± 4,1	18,3 ± 2,5	24,8 ± 2,5 ^{1, 3}
20 : 5ω3	49,8 ± 7,4	55,7 ± 8,2	64,3 ± 5,8 ²	79,8 ± 7,3 ^{1, 3}
22 : 6ω3	65,6 ± 6,5	72,1 ± 9,1	88,7 ± 5,8 ²	105,3 ± 9,8 ^{1, 3}
Σ ω3 ПНЖК	149,5 ± 11,6	168,1 ± 12,3	195,8 ± 10,7 ²	239,1 ± 15,8 ^{1, 3}
Σ ПНЖК	217,3 ± 11,6	239,6 ± 11,5	279,6 ± 11,9 ²	324,9 ± 13,0 ^{1, 3}

1 – различия между группами рыб № 1 и 2, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 2 – различия между рыбами группы № 1 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$; 3 – различия между рыбами группы № 2 в июне и сентябре, статистически значимые при $p \leq 0,05$.

Достаточное накопление ТАГ в мышечной ткани лососевых рыб в аквакультуре во многом определяет органолептические характеристики конечного продукта [11].

Как нами было показано в ранее проведенном исследовании [12], жирнокислотный состав тканей радужной форели меняется уже на 20-й день после смены корма. В июне, через месяц после перевода форели группы № 2 на другой корм и начала активного кормления, установлены различия в концентрации некоторых жирных кислот в тканях рыб 2-х изученных групп (см. табл. 3, 4), причем в мышцах форели группы № 2 увеличивалось количество $\omega 3$ ПНЖК, а концентрация МНЖК во внутреннем жире возрастала у рыб группы № 1, что соответствовало преобладанию данных классов жирных кислот в корме, которым питались рыбы (см. табл. 2–4).

В результате проведенного исследования не установлено различий в содержании НЖК в тканях у 2-х групп рыб за весь экспериментальный период (см. табл. 3, 4). Исключение составило накопление НЖК во внутреннем жире форели группы № 2 к сентябрю (см. табл. 4), что, возможно, объясняется более активным синтезом данных жирных кислот у этой группы радужной форели. К окончанию эксперимента в тканях 2-х групп рыб возрастала концентрация МНЖК и ПНЖК. Мононенасыщенные жирные кислоты преимущественно запасались во внутреннем жире форели, причем наиболее значительно у рыб группы № 1 (см. табл. 4). Сезонные изменения содержания $\omega 3$ ПНЖК и $\omega 6$ ПНЖК в тканях рыб не совпадали (см. табл. 3, 4). Во внутреннем жире накопление $\omega 6$ ПНЖК не обнаружено, и содержание данных жирных кислот у рыб 2-х групп не различалось (см. табл. 4). В мышечной ткани, напротив, уровень $\omega 6$ ПНЖК возрастал к сентябрю, причем одинаково у рыб групп № 1 и 2. Селективное накопление ПНЖК в мышцах рыб по сравнению с другими жирными кислотами было показано в ранее проведенных исследованиях [13].

Установлено увеличение количества $\omega 3$ ПНЖК в тканях форели в сентябре, однако накопление проходило более интенсивно у группы № 2 (см. табл. 3, 4). В составе $\omega 3$ ПНЖК присутствуют физиологически значимые ЭПК и ДГК кислоты, достаточное количество в корме и высокий уровень ассимиляции которых крайне важен для организма рыб. Эйкозапентаеновая и ДГК необходимы для функционирования мозга, зрения и нервной системы, а также для устойчивости к стрессу и болезням, поскольку являются предшественниками эйкозаноидов [1]. Кроме того, ЭПК и ДГК играют важную роль в обеспечении ростовых процессов форели, во многом определяя ее нормальное развитие [9]. В нашем исследовании более высокая концентрация данных жирных кислот в тканях рыб группы № 2 (см. табл. 3, 4), возможно, способствовала лучшему темпу их роста по сравнению с форелью группы № 1, что было отражено при оценке линейно-весовых параметров рыб в табл. 1.

Заключение

Таким образом, у двух изученных групп радужной форели обнаружена одинаковая степень усвояемости насыщенных, моно- и полиненасыщенных жирных кислот, вне зависимости от различий в жирнокислотном составе использованных кормов и месяца исследования. Установлен низкий уровень ассимиляции мононенасыщенных жирных кислот, депонирование которых осуществлялось в основном во внутреннем жире радужной форели. Лучше всего усваивались полиненасыщенные жирные кислоты, которые преимущественно накапливались в мышечной ткани рыб. Полученные в нашей работе результаты могут быть использованы в поиске сбалансированных рецептур комбикормов для лососевых рыб и быть основой для практических рекомендаций при составлении научного обоснования повышения качества производимых кормов.

Список источников

1. Tocher D. R. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish // Reviews in Fisheries Science. 2003. V. 11. N. 2. P. 107–184.
2. Sargent J. R., Tocher D. R., Bell J. G. The lipids. San Diego: Academic Press, 2002. Chap. 4. Fish Nutrition. P. 181–257.
3. Zhao J., Wen X. B., Li S. K., Zhu D. S., Li Y. Y. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and antioxidant parameters of juvenile mud crab (*Scylla paramamosain*) // Aquaculture. 2015. V. 435. P. 200–206.
4. Patricia A., Ana L. M., Narcisa M. B., Tiago R., Maria L. N., Rui R., Ant'onio M. Effect of warming on protein, glycogen and fatty acid content of native and invasive clams // Food Res. Int. 2014. V. 64. P. 439–445.
5. Huang Y., Wen X., Li S., Li W., Zhu D. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition, fatty acid profiles and antioxidant parameters of juvenile chu's croaker *Nibeacoibor* // Aquacult. Int. 2016. V. 24. P. 1229–1245.
6. Dernekbaşı S. Digestibility and liver fatty acid composition of Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed by graded levels of canola oil // Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2012. V. 12. P. 105–113.
7. Цыганов Э. П. Метод прямого метилирования липидов после ТСХ без элюирования с силикагеля // Лабораторное дело. 1971. № 8. С. 490–493.
8. Hansen J., Berge G. M., Hillestad M., Krogdahl A., Galloway T. F., Holm H., Holm J., Ruyter B. Apparent digestion and apparent retention of lipid and fatty acids in Atlantic cod (*Gadus morhua*) fed increasing dietary lipid levels // Aquaculture. 2008. V. 284. N. 1–4. P. 159–166.
9. Koven W. M., Henderson R. J., Sargent J. R. Lipid digestion in turbot (*Scophthalmus maximus*). I: Lipid class and fatty acid composition of digesta from different segments of the digestive tract // Fish Physiology and Biochemistry. 1994. V. 13. N. 1. P. 69–79.
10. Sotoudeh E., Kenari A. A., Rezaei M. H. Growth response, body composition and fatty acid profile of Caspian brown trout (*Salmo trutta caspius*) juvenile fed diets contain-

ing different levels of soybean phosphatidylcholine // *Aquacult Int.* 2011. V. 19. P. 611–623.

11. Остроумова И. Н. Биологические основы кормления рыб. СПб., 2001. 372 с.

12. Назарова М. А., Васильева О. Б., Немова Н. Н. Сезонные изменения липидного состава тканей радужной форели *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), выращенной на различных кормах // Уч. зап. Петрозав. гос.

ун-та. Сер.: Биологические науки. 2017. № 6 (167). С. 12–20.

13. López L. M., Durazo E., Viana M. T., Drawbridge M., Bureau D. P. Effect of dietary lipid levels on performance, body composition and fatty acid profile of juvenile white seabass, *Atractoscion nobilis* // *Acuaculture*. 2009. V. 298. N. 1-2. P. 101–105.

References

1. Tocher D. R. Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish. *Reviews in Fisheries Science*, 2003, vol. 11, no. 2, pp. 107-184.

2. Sargent J. R., Tocher D. R., Bell J. G. *The lipids*. San Diego, Academic Press, 2002. Chap. 4. Fish Nutrition. Pp. 181-257.

3. Zhao J., Wen X. B., Li S. K., Zhu D. S., Li Y. Y. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition and antioxidant parameters of juvenile mud crab (*Scylla paramamosain*). *Aquaculture*, 2015, vol. 435, pp. 200-206.

4. Patricia A., Ana L. M., Narcisa M. B., Tiago R., Maria L. N., Rui R., Antó nio M. Effect of warming on protein, glycogen and fatty acid content of native and invasive clams. *Food Res. Int.*, 2014, vol. 64, pp. 439-445.

5. Huang Y., Wen X., Li S., Li W., Zhu D. Effects of dietary lipid levels on growth, feed utilization, body composition, fatty acid profiles and antioxidant parameters of juvenile chu's croaker *Nibeacorb*. *Aquacult. Int.*, 2016, vol. 24, pp. 1229-1245.

6. Dernekbaşı S. Digestibility and liver fatty acid composition of Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed by graded levels of canola oil. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2012, vol. 12, pp. 105-113.

7. Tsyganov E. P. Metod priamogo metilirovaniia lipidov posle TSKh bez eluirovaniia s silikagelia [Direct lipid methylation method after TLC without silica gel elution]. *Laboratornoe delo*, 1971, no. 8, pp. 490-493.

8. Hansen J., Berge G. M., Hillestad M., Krogdahl A., Galloway T. F., Holm H., Holm J., Ruyter B. Apparent di-

gestion and apparent retention of lipid and fatty acids in Atlantic cod (*Gadus morhua*) fed increasing dietary lipid levels. *Acuaculture*, 2008, vol. 284, no. 1-4, pp. 159-166.

9. Koven W. M., Henderson R. J., Sargent J. R. Lipid digestion in turbot (*Scophthalmus maximus*). I: Lipid class and fatty acid composition of digesta from different segments of the digestive tract. *Fish Physiology and Biochemistry*, 1994, vol. 13, no. 1, pp. 69-79.

10. Sotoudeh E., Kenari A. A., Rezaei M. H. Growth response, body composition and fatty acid profile of Caspian brown trout (*Salmo trutta caspius*) juvenile fed diets containing different levels of soybean phosphatidylcholine. *Aquacult Int.*, 2011, vol. 19, pp. 611-623.

11. Остроумова И. Н. *Биологические основы кормления рыб* [Biological principles of fish feeding]. Saint-Petersburg, 2001. 372 p.

12. Nazarova M. A., Vasil'eva O. B., Nemova N. N. Sezonnnye izmeneniia lipidnogo sostava tkanei raduzhnoi foreli *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792), vyrashchennoi na razlichnykh kormakh [Seasonal changes in lipid composition of tissues of rainbow trout *Parasalmo mykiss* (Walbaum, 1792) reared on different feeds]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie nauki*, 2017, no. 6 (167), pp. 12-20.

13. López L. M., Durazo E., Viana M. T., Drawbridge M., Bureau D. P. Effect of dietary lipid levels on performance, body composition and fatty acid profile of juvenile white seabass, *Atractoscion nobilis*. *Acuaculture*, 2009, vol. 298, no. 1-2, pp. 101-105.

Статья поступила в редакцию 15.08.2022; одобрена после рецензирования 07.11.2023; принята к публикации 02.03.2023
The article is submitted 15.08.2022; approved after reviewing 07.11.2023; accepted for publication 02.03.2023

Информация об авторах / Information about the authors

Ольга Борисовна Васильева – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории экологической биохимии; Карельский научный центр Российской академии наук; olga_4428@mail.ru

Марина Александровна Назарова – кандидат биологических наук; доцент кафедры биологии и химии; Вологодский государственный университет; marinamarina35@yandex.ru

Нина Николаевна Немова – доктор биологических наук, профессор, академик РАН; главный научный сотрудник лаборатории экологической биохимии; Карельский научный центр Российской академии наук; nemova@krc.karelia.ru

Olga B. Vasil'eva – Candidate of Sciences in Biology; Senior Researcher of the Laboratory of Environmental Biochemistry; Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences; olga_4428@mail.ru

Marina A. Nazarova – Candidate of Sciences in Biology; Assistant Professor of the Department of Biology and Chemistry; Vologda State University; marinamarina35@yandex.ru

Nina N. Nemova – Doctor of Sciences in Biology, Professor, Academician of RAS; Chief Researcher of the Laboratory of Environmental Biochemistry; Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences; nemova@krc.karelia.ru

