

УДК 577.1:597.552.5

ЖИРНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ МОЛОДИ АРКТИЧЕСКОГО ГОЛЬЦА (*SALVELINUS ALPINUS* COMPLEX) ИЗ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ И АКВАКУЛЬТУРЫ

© 2024 г. А. Е. Рудченко^{1,2,*}, В. А. Карпов¹, член-корреспондент РАН Н. Н. Сущик^{1,2}, Л. А. Глущенко¹, член-корреспондент РАН М. И. Гладышев^{1,2}

Поступило 13.11.2023 г.

После доработки 23.11.2023 г.

Принято к публикации 24.11.2023 г.

Установлены значительные отличия жирнокислотного состава мышечной ткани молоди арктического гольца *Salvelinus alpinus* [Linnaeus, 1758] из естественной среды обитания (оз. Собачье) и аквакультуры, а также молоди проходной формы гольца (мальмы) *Salvelinus malma* [Walbaum, 1792] из р. Авача. Выявленные отличия между аквакультурной и дикой молодью гольца были связаны с разными источниками пищи. Для мышечной ткани молоди гольцов из естественной среды обитания были характерны значительно более высокие уровни жирных кислот – биомаркеров диатомовых водорослей, а также биомаркеров морских copepod у проходной формы. У молоди гольцов из аквакультуры были выявлены достоверно более высокие уровни линолевой кислоты, а также длинноцепочечных мононенасыщенных кислот, источником которых могли быть аквакультурные корма. Выявленные различия в питании молоди аквакультурных и диких гольцов не оказали влияния на содержание в мышечной ткани биохимически ценных омега-3-полиненасыщенных жирных кислот: содержание эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот у молоди из естественных экосистем и аквакультуры было близким.

Ключевые слова: арктический голец, молодь рыб, биомаркерные жирные кислоты, жирнокислотный состав, аквакультура.

DOI: 10.31857/S2686738924020014, **EDN:** WGBPJA

Рыбные ресурсы – как морские, так и пресноводные виды рыб – считаются одним из основных источников омега-3-полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) для человека [1]. Ранее нами были обнаружены виды и формы пресноводных рыб с высоким содержанием наиболее ценных омега-3 ПНЖК – эйкозапентаеновой кислоты (ЭПК, 20:5n⁻³) и докозагексаеновой кислоты (ДГК, 22:6n⁻³). Так, установлено, что некоторые формы арктического гольца *Salvelinus alpinus* complex [Linnaeus, 1758] из озер Норило-Пясинской системы содержат в мышечной ткани от 3.5 до 21.1 мг/г ЭПК + ДГК [2]. При этом арктический голец перспективен для введения в товарную аквакультуру из-за достаточно быстрого темпа роста [3].

Одним из важных вопросов при введении вида в аквакультуру является не только получение высокопродуктивных пород, но и сохранение биохимического качества рыбной продукции. Известно, что содержание ЭПК и ДГК в рыбах зависит в первую очередь от филогенетической принадлежности [4]. Рыбы отряда лососеобразных считаются одними из самых ценных видов по содержанию длинноцепочечных омега-3 ПНЖК. Однако при аквакультурном выращивании лососевых рыб одним из важных факторов, влияющих на состав и содержание жирных кислот в их мышечной ткани, являются используемые пищевые ресурсы [5]. В естественных экосистемах высокий генетический потенциал гольцов, обуславливающий значительное содержание в них ЭПК и ДГК, поддерживается кормовой базой, богатой источниками этих ЖК (диатомовые, динофитовые водоросли). При выращивании гольцов в условиях аквакультуры состав и содержание ЖК, вероятно, будет зависеть от состава и качества используемых кормов, а пищевая ценность гольца как источника ЭПК и ДГК может

¹Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук Федерального исследовательского центра “Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Красноярск, Россия

*E-mail: arudchenko@sfu-kras.ru

Таблица 1. Содержание жирных кислот (% от суммы ЖК, среднее значение \pm стандартная ошибка) в мышечной ткани молоди арктического гольца (*Salvelinus alpinus*) и мальмы (*Salvelinus malma*) из аквакультуры и естественных экосистем. Величины имели нормальное распределение (согласно критерию Колмогорова – Смирнова). Значения, отмеченные одной буквой, не имели достоверных отличий в дисперсионном анализе по критерию Тьюки. Статистически достоверные значения ($p < 0.05$) приведены жирным шрифтом, n – число проб.

	Аквакультура 1			Аквакультура 2			оз. Собачье			р. Авача			F	p
	n^{10}			n^{10}			n^5			n^5				
	m	\pm	SE	m	\pm	SE	m	\pm	SE	m	\pm	SE		
14:0	1.3	\pm	0.2 ^A	1.3	\pm	0.1 ^A	2.6	\pm	0.4 ^B	3.2	\pm	0.0 ^B	14.9	0.0001
15–17 РЖК	1.0	\pm	0.1 ^A	0.8	\pm	0.1 ^{AB}	1.3	\pm	0.1 ^{AC}	1.1	\pm	0.1 ^{AC}	6.3	0.0049
16:1 n^7	2.6	\pm	0.2 ^A	2.5	\pm	0.1 ^A	6.6	\pm	1.8 ^B	7.1	\pm	0.1 ^B	7.9	0.0018
18:1 n^9	27.3	\pm	2.0 ^A	33.6	\pm	1.5 ^A	15.6	\pm	3.4 ^B	25.4	\pm	1.3 ^A	11.1	0.0003
18:2 n^6	11.0	\pm	0.6 ^A	12.5	\pm	0.7 ^A	2.3	\pm	0.3 ^B	0.7	\pm	0.0 ^B	138.0	0.0000
18:3 n^3	2.5	\pm	0.1 ^A	2.8	\pm	0.1 ^A	4.3	\pm	1.96 ^A	0.3	\pm	0.0 ^B	15.8	0.0001
$\Sigma 20:1$	3.3	\pm	0.3 ^A	2.7	\pm	0.2 ^A	0.9	\pm	0.2 ^B	2.1	\pm	0.2 ^A	22.5	0.0000
20:4 n^6	1.2	\pm	0.2 ^A	1.1	\pm	0.1 ^A	2.3	\pm	0.6 ^B	0.6	\pm	0.1 ^A	5.1	0.0118
20:5 n^3	4.6	\pm	0.7 ^A	2.6	\pm	0.3 ^B	7.9	\pm	1.9 ^C	7.1	\pm	0.1 ^C	5.5	0.0088
$\Sigma 22:1$	1.7	\pm	0.3 ^A	1.2	\pm	0.1 ^A	0.2	\pm	0.0 ^B	1.5	\pm	0.3 ^A	11.2	0.0003
22:5 n^3	1.0	\pm	0.1 ^A	0.7	\pm	0.0 ^A	2.0	\pm	0.3 ^B	2.0	\pm	0.1 ^B	7.9	0.0018
22:6 n^3	15.3	\pm	2.2 ^A	8.1	\pm	1.1 ^B	15.3	\pm	4.1 ^A	16.2	\pm	0.2 ^A	5.9	0.0198
НЖК	20.9	\pm	0.4 ^A	22.8	\pm	0.8 ^A	29.6	\pm	1.6 ^B	27.2	\pm	0.1 ^B	18.1	0.0000
МНЖК	38.8	\pm	2.7 ^A	44.2	\pm	1.6 ^A	29.0	\pm	5.8 ^B	41.9	\pm	0.1 ^A	4.1	0.0247
ПНЖК	40.2	\pm	2.3	33.0	\pm	1.1	41.4	\pm	7.3	30.9	\pm	0.2	1.8	0.1861

Примечание: 15–17 РЖК – жирные кислоты с разветвленной цепью атомов углерода, НЖК – насыщенные жирные кислоты, МНЖК – мононенасыщенные жирные кислоты, ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты.

оказаться как ниже, так и выше по сравнению с дикими рыбами.

Целью работы было сравнение жирнокислотного состава мышечной ткани молоди арктического гольца из озера, реки и экспериментальной аквакультуры для выявления различий в биохимической ценности диких и вводимых в аквакультуру рыб. Также проведен поиск ЖК-биомаркеров, которые могут быть использованы для установления происхождения гольцов из естественной среды обитания либо аквакультуры.

Годовики и двухлетки арктического гольца были отобраны из двух аквакультурных хозяйств, которые осуществляют экспериментальное выращивание одной и той же исходной формы. Дикие особи молоди арктического гольца отбирались в оз. Собачье (Норило-Пясинская система, Красноярский край), откуда ранее был получен рыбопосадочный материал для экспериментальной аквакультуры. Кроме того, была отловлена молодь проходной формы гольца (мальмы) *Salvelinus malma* [Walbaum, 1792] из р. Авача (Камчатский край). Возраст особей из природных экосистем составлял от 0+ до 2, и аквакультуры – от 1+ до 3+. Для анализа отбирали мышечную ткань (0.5–1.0 г) со спинной стороны молоди

гольцов. Липиды из тканей экстрагировали методом Фолча с модификациями. Этапы подготовки проб и анализа ЖК методом хромато-масс-спектрометрии были описаны ранее [2]. Расчеты средних значений и стандартных ошибок, дисперсионный анализ и анализ главных компонент выполнены с использованием пакета Statistica 9.0 (StatSoft Inc.).

Анализ главных компонент процентного содержания ЖК от общей суммы в мышечной ткани показал значительные отличия молоди гольцов из естественной среды обитания и аквакультуры (рис. 1). ЖК состав молоди гольцов из двух экспериментальных аквакультур был близок и не имел значительных отличий уровней основных кислот, за исключением ДГК (табл. 1). Мышечная ткань аквакультурной молоди отличалась достоверно более высокими процентами 18:1 n^9 , 18:2 n^6 , и мононенасыщенных ЖК с 20 и 22 атомами углерода ($\Sigma 20:1$ и $\Sigma 22:1$) (см. рис. 1, табл. 1), по сравнению с молодью гольца выросшей в оз. Собачьем. Вероятно, аквакультурный голец получал эти ЖК из корма, содержащего растительные масла, которые богаты 18:1 n^9 и 18:2 n^6 [6–8]. Напротив, мышечная ткань молоди гольца из оз. Собачье отличалась достоверно более высокими уровнями кислот: 14:0, 16:1 n^7 ,

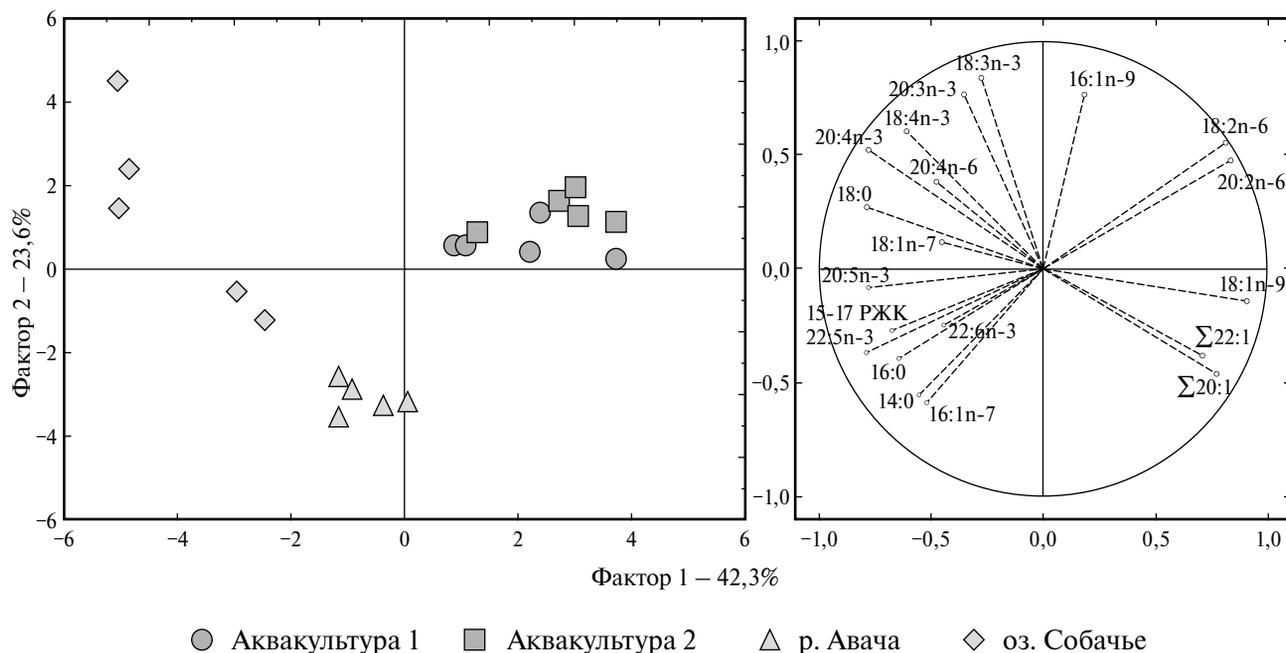


Рис. 1. Анализ главных компонент жирнокислотного состава (% от суммы ЖК) в мышечной ткани молоди арктического гольца (*Salvelinus alpinus*) и мальмы (*Salvelinus malma*) из аквакультуры и естественных экосистем.

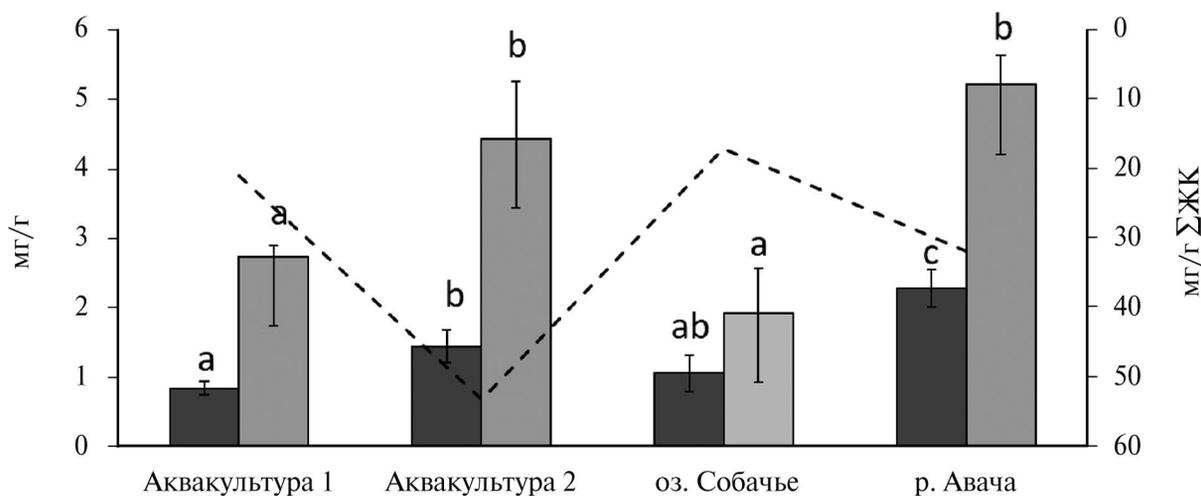


Рис. 2. Содержание эйкозапентаеновой кислоты (ЭПК), докозагексаеновой кислоты (ДГК) и суммарное содержание жирных кислот (ΣЖК) (мг/г сырой массы) в мышечной ткани молоди арктического гольца (*Salvelinus alpinus*) и мальмы (*Salvelinus malma*) из аквакультуры и естественных экосистем. Значения, отмеченные одной буквой, не имели достоверных отличий в дисперсионном анализе по критерию Тьюки при уровне значимости $p < 0.05$.

и $20:5n^{-3}$ (см. рис. 1, табл. 1). Вероятными источниками этих ЖК являются диатомовые водоросли [9], которые находятся в основе пищевых сетей олиготрофных озер Норило-Пясинской системы. Очевидно, что отличия ЖК состава молоди из оз. Собачье и аквакультуры, посадочный материал которой был получен от особей, обитавших в оз. Собачье, обусловлены различными источниками пищи. Пищевой фактор, вероятно, повлиял и на особенности ЖК состава проходной формы камчатского гольца – мальмы. В мышечной ткани мо-

лоди проходного гольца из р. Авача был отмечен высокий процент кислот $\Sigma 20:1$ и $\Sigma 22:1$ (см. табл. 1). Высоким содержанием этих ЖК отличаются морские копеподы, которые могут накапливаться в дикой молоди гольцов, передаваясь по цепям питания в случае их нагула в устьевой части реки, где возможно присутствие морских копепод. Кроме того, крупная молодь мальмы может поедать икру проходных лососевых рыб [10]. Аквакультурная молодь гольцов получает эти ЖК из кормов, в которые добавляют рыбную муку и биомассу копе-

под морского происхождения, содержащих высокие уровни 20:1 и 22:1 [11]. С другой стороны, так же как у молоди гольца из оз. Собачье, мышечная ткань молоди проходной формы из р. Авача отличалась высокими уровнями: 14:0, 16:1 n^{-7} , и 20:5 n^{-3} (см. табл. 1), происходящими, вероятно, из диатомовых водорослей.

Однако фактор питания, вероятно, не повлиял на содержание ценных омега-3 ПНЖК на единицу массы мышечной ткани исследуемой молоди. Голец из двух аквакультурных хозяйств содержал 3.5 ± 0.3 и 5.5 ± 1.1 мг/г сырой массы ЭПК + ДГК, тогда как голец из оз. Собачье – около 3.0 ± 0.6 мг/г, а проходной голец из р. Авача – 7.5 ± 0.9 мг/г ЭПК+ДГК (рис. 2). Выявленные отличия не всегда были достоверны. Вероятно, содержание ЭПК и ДГК в данном случае не отражало характер питания, а было связано с накоплением общих липидов в мышечной ткани. Подобная тенденция была отмечена для половозрелых гольцов разных форм [2]. Кроме того, полученные данные говорят о высоком, и даже близком ко взрослым особям, содержании у неполовозрелых гольцов ЭПК и ДГК.

Таким образом, биохимическая ценность молоди одной и той же формы арктического гольца из аквакультуры и естественной экосистемы, как источника длинноцепочечных ПНЖК, оказалась близка. На данном этапе онтогенеза аквакультурный голец сохраняет свою высокую пищевую ценность как источник ЭПК и ДГК. Однако по мере роста экспериментального стада арктического гольца в аквакультуре следует оценить состав и содержание ЖК на последующих стадиях и при достижении товарных размеров и половой зрелости.

Кроме того, были установлены отдельные ЖК, уровни которых значительно различались у аквакультурных и диких форм, которые можно использовать в качестве биохимических маркеров при определении происхождения гольцов и их рыбных продуктов. Повышенное содержание таких ЖК, как 14:0, 16:1 n^{-7} и 20:5 n^{-3} , может указывать на происхождение как жилых, так и проходных форм из естественных экосистем, а высокий уровень 18:2 n^{-6} может указывать на аквакультурное происхождение гольцов. Эти данные могут быть использованы при проведении экспертиз или уточнения местообитания при условии дополнительных исследований разнообразных форм и местообитаний арктического гольца.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом РНФ (проект № 22-24-20023), Красноярским краевым фондом науки. Организационная поддержка полевых и рыбохозяйственных исследований обеспечена Проектным офисом развития Арктики (ПОРА).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ И СТАНДАРТОВ

Исследования с животными были одобрены комиссией Комитета по биомедицинской этике Сибирского федерального университета (протокол от 23.01.2022 г. № 1).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tocher D.R.* Metabolism and functions of lipids and fatty acids in teleost fish // *Rev. Fish. Sci.* 2003. V. 11. № 2. P. 107–184.
2. *Gladyshev M.I., Makhrov A.A., Baydarov I.V., et al.* Fatty acid composition and contents of fish of genus *Salvelinus* from natural ecosystems and aquaculture // *Biomolecules.* 2022. V 12 (1). P. 144.
3. *Никандров В.Я., Павлисов А.А., Шиндавина Н.И. и др.* Арктический голец (*Salvelinus alpinus* L.) – перспективный объект для аквакультуры севера России // *Арктика: экология и экономика.* 2018. № 3 (31). С. 137–143.
4. *Vasconi M., Caprino F., Bellagamba F. et al.* Fatty acid composition of freshwater wild fish in subalpine lakes: a comparative study // *Lipids.* 2015. V. 50. № 3. P. 283–302.
5. *Gladyshev M.I., Makhrov A.A., Sushchik N.N., et al.* Differences in composition and fatty acid contents of different rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) strains in similar and contrasting rearing conditions // *Aquaculture.* 2022. V. 556. P. 738265.
6. *Nasopoulou C., Zabetakis I.* Benefits of fish oil replacement by plant originated oils in compounded fish feeds. A review // *LWT – Food Science and Technology.* 2012. V. 47. P. 217–224.
7. *Teves J.F., Ragaza J.A.* The quest for indigenous aquafeed ingredients: a review // *Reviews in Aquaculture.* 2016. V. 8. P. 154–171.
8. *Гладышев М.И.* Наземные источники полиненасыщенных жирных кислот для аквакультуры // *Вопросы ихтиологии.* 2021. Т. 61, № 4. С. 471–485. [*Gladyshev M.I.* Terrestrial sources of polyunsaturated fatty acids for aquaculture // *Journal of Ichthyology.* 2021. Vol. 61. № 4. P. 632–645.]
9. *Claustre H., Marty J.C., Cassiani L., et al.* Fatty acid dynamics in phytoplankton and microzooplankton communities during a spring bloom in the coastal Ligurian Sea: ecological implications // *Mar. Micr. Food Webs.* 1989. V. 3. № 2. P. 51–66.
10. *Ярош Н.В., Травина Н.Т.* Питание разновозрастной молоди мальмы *Salvelinus malma* (Walb.) в нижнем течении реки Большая (западная Камчатка) // *Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана.* 2011. Т. 20. № 4. С. 52–55.
11. *Лагуткина Л.Ю.* Перспективное развитие мирового производства кормов для аквакультуры: альтернативные источники сырья // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство.* 2017. № 1. С. 67–78.

**FATTY ACID PROFILE OF JUVENILE ARCTIC CHAR
(*SALVELINUS ALPINUS* COMPLEX) FROM
NATURAL ECOSYSTEMS AND AQUACULTURE**

**A. E. Rudchenko^{a, b, #}, V. A. Karpov^a, Corresponding Member of RAS N. N. Sushchik^{a, b},
L. A. Glushchenko^a, Corresponding Member of RAS M. I. Gladyshev^{a, b}**

^a*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^b*Institute of Biophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Federal Research Center
“Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: arudchenko@sfu-kras.ru*

Significant differences in the fatty acid composition of the muscle tissue of juvenile Arctic char *Salvelinus alpinus* [Linnaeus, 1758] from the natural habitat (Lake Sobachye) and aquaculture, as well as juveniles of the anadromous form of char (malma) *Salvelinus malma* [Walbaum, 1792] from the Avacha River. The observed differences between aquaculture and wild juvenile char were associated with different food sources. The muscle tissue of juvenile char from natural habitat was characterized by significantly higher levels of fatty acids – biomarkers of diatoms, as well as biomarkers of marine copepods in the anadromous form. In the fatty acid composition of juvenile char from aquaculture, significantly higher levels of linoleic acid were revealed, as well as long-chain monounsaturated acids, the source of which could be aquaculture feed. The identified differences did not have a significant effect on the content of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids in the muscle tissue of juvenile aquaculture and wild char. The content of biochemically valuable omega 3 polyunsaturated fatty acids in juvenile char from natural ecosystems and aquaculture was similar.

Keywords: arctic char, juvenile fish, biomarker fatty acids, fatty acid composition, aquaculture.