

УДК 577.115.3 + 577.359

СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ЖИРНЫХ КИСЛОТ В МЫШЕЧНОЙ ТКАНИ АЛТАЙСКОГО ОСМАНА ПОТАНИНА *OREOLEUCISCUS POTANINI* (CYPRINIFORMES, ACTINOPTERIGII) ИЗ ВОДОХРАНИЛИЩ МОНГОЛИИ

© 2024 г. Академик РАН Ю. Ю. Дгебуадзе^{1, *}, член-корреспондент РАН Н. Н. Сушик^{2, 3},
Б. Мэндсайхан (B. Mendsaikhan)⁴, Д. Алтансукх (D. Altansukh)⁵,
А. Ю. Емельянова², член-корреспондент РАН М. И. Гладышев^{2, 3}

Поступило 25.04.2024 г.

После доработки 05.05.2024 г.

Принято к публикации 07.05.2024 г.

Впервые исследованы состав жирных кислот в мышечной ткани уникальных центральноазиатских карпообразных рыб: алтайского османа Потанина *Oreoleuciscus potanini*. Рассмотрены популяции этих рыб в водохранилищах полупустынной зоны (Дургунском и Тайширском) в период их формирования. Показано, что содержание эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК) кислот *O. potanini* соответствует медианному значению этой величины в отряде Карпообразных. Установлено, что основу пищевой сети растительной формы данного вида составляют микроводоросли: диатомеи, эвглены и, возможно, хризифиты, а также бактерии. При этом уровни биомаркеров бактерий, 15-17РЖК и 17:0 были достоверно выше у рыб в Дургунском водохранилище, а уровень ЭПК (биомаркера диатомей) — у *O. potanini* Тайширского водохранилища. Установленные более высокие величины содержания тяжелого изотопа азота в мышцах *O. potanini* из Тайширского водохранилища, скорее всего связаны с еще не сформировавшимися бентосными сообществами и с незавершившейся диверсификацией речной формы алтайского османа Потанина в озерные формы.

Ключевые слова: эйкозапентаеновая кислота (ЭПК), докозагексаеновая кислота (ДГК), стабильные изотопы, *Oreoleuciscus potanini*, водохранилища, пищевые сети

DOI: 10.31857/S2686738924050131

Рыба, как известно, является основным пищевым источником длинноцепочечных полиненасыщенных жирных кислот семейства омега-3 (ПНЖК) — протекторов сердечно-сосудистых заболеваний человека [1, 2]. Кроме того, рыбы являются

компонентом питания некоторых наземных животных и обеспечивают тем самым перенос на сушу ПНЖК и других важных для пищевых сетей веществ, производимых в водных экосистемах. Однако, содержание ПНЖК, а именно суммы эйкозапентаеновой (20:5n-3, ЭПК) и докозагексаеновой (22:6n-3, ДГК) кислот в съедобной биомассе (мышечной ткани) разных видов рыб различается в 300 раз, то есть, далеко не все рыбы являются реальным пищевым источником этих биологически активных веществ [3]. Содержание ЭПК и ДГК в биомассе рыб определяется комплексом филогенетических и экологических факторов, однако, конкретные механизмы и соотношение влияния данных факторов известны не в полной мере [3]. Одним из возможных путей изучения указанных механизмов является сбор сведений о содержании ПНЖК в различных видах рыб из разнообразных водных бассейнов для последующего сравнительного анализа [4, 5].

Большой интерес для понимания качественных характеристик трофических взаимодействий

¹Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия

²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия, Федеральный исследовательский центр “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

⁴Институт географии и геоэкологии академии наук Монголии Institute of Geography and Geocology of Mongolian Academy of Sciences, Ulanbaatar-15170, Mongolia

⁵Западный региональный филиал Монгольского государственного университета Western Regional Branch of National University of Mongolia

*e-mail: yudgeb@yandex.ru

в экосистемах представляют рыбы, обитающие в специфических условиях водоемов семиаридной зоны. Одним из таких объектов являются алтайские османы рода *Oreoleuciscus*, населяющие Центральнoазиатский бессточный бассейн в Монголии. В западной части этого бассейна (Котловине больших озер) обитает алтайский осман Потанина *Oreoleuciscus potanini*, являющийся абсолютным доминантным в рыбном населении рек и озер. Кроме *O. potanini* здесь встречаются только монгольский хариус *Thymallus brevirostris* и 1–2 вида сибирских усатых голцов родов *Orthrias* и *Triplophysa* [6]. Многообразие условий Котловины (пресные и солоноватые озера, малые и средние реки равнин и предгорий), бедное рыбное население, низкая первичная продукция [7] способствовали большой морфологической и экологической изменчивости *O. potanini*. Для этого вида описаны четыре внутривидовые формы: рыбоядная, растительноядная, острорылая и речная, различающиеся по морфологии и образу жизни. По результатам анализа содержимого кишечника, у растительноядной формы в питании преобладают растения, у рыбоядной формы – рыба, у острорылой – планктон, у речной формы – главным образом личинки амфибиотических насекомых. При этом наблюдается большая изменчивость и перекрывание спектров питания форм. В связи с тем, что внутривидовая структура рыб рода *Oreoleuciscus* весьма изменчива по причине циклического образования форм [8] и вариации в соотношении форм в водоеме, представляет интерес выявление механизмов пищевой дифференциации этих рыб при формировании новых местообитаний, в частности водохранилищ. Решить эти вопросы помогают современные подходы: «биомаркеры» (содержание ПНЖК) и анализ стабильных изотопов.

В начале XXI века в Котловине больших озер было построено 2 водохранилища: в 2007 г. – Тайширское на р. Дзабхан (Завхан) (46°41'39"с.ш., 96°39'57" в.д.), и в 2008 г. – Дургунское на протоке Чоно-Харайх, соединяющей озера Хар-Ус и Хар (48°19'33"с.ш., 92°48'25" в.д.). Сведения о водохранилищах и их биоте опубликованы в специальной сводке [9]. Важно отметить, что Дургунское водохранилище получило алтайского османа Потанина с уже образованными внутривидовыми формами из окружающих его озер, в то время как в Тайширском водохранилище формы *O. potanini* начали формироваться после заполнения водохранилища из речной (генерализованной) формы р. Дзабхан.

Цель настоящей работы с помощью современных методик уточнить спектры питания растительноядной формы алтайского османа Потанина и установить их особенности при формировании популяций водохранилищ. Одной из задач работы было определение состава и содержания жирных кислот (ЖК) в биомассе алтайского османа

Потанина из двух водохранилищ Монголии для использования их в качестве меток переноса веществ по пищевым сетям и определения потенциальной питательной ценности для человека двух популяций этих рыб по содержанию ценных ЖК: эйкозопентаеновой (ЭПК) и докозогексаеновой (ДГК).

Пробы рыб были взяты из сетных уловов (ячея 20–60 мм) в Дургунском (46°42.385'с.ш., 96°39.834' в.д.) и Тайширском водохранилищах (46°42.385'с.ш., 96°39.834' в.д.) в августе 2023 г. Рассматривали только представителей растительноядной формы *O. potanini*. Методы отбора проб мышечной ткани, анализа стабильных изотопов и анализа ЖК методом хромато-масс-спектрометрии были описаны ранее [10].

В ходе исследований были впервые получены данные о составе и содержании жирных кислот (ЖК) в биомассе алтайского османа Потанина.

Результаты анализа ЖК алтайского османа Потанина представлены в таблице. Прежде всего стоит отметить относительно высокие уровни жирных кислот –16:1n-7 и ЭПК, которые являются маркерами диатомовых водорослей [11]. Вероятно, диатомеи составляют основу питания растительноядной формы *O. potanini*, причем в Тайширском водохранилище вклад этих водорослей в питание рыб выше, чем в Дургунском (табл. 1). Кроме того, относительно высокие уровни 18:2n-6 и ДГК в алтайском османе Потанина (табл.) могут свидетельствовать о значительном вкладе в их питание эвгленовых водорослей [12]. Уровень 18:2n-6 также может являться маркером вклада высших растений, в том числе наземных [13]. Однако, относительно низкий уровень другого важного биомаркера высших растений – 18:3n-3 и полное отсутствие таких специфических маркеров как насыщенные ЖК с 22–26 атомами углерода [13] позволяют утверждать, что в рационе растительноядной формы *O. potanini* преобладают водоросли.

Высокий уровень ДГК (табл. 1) свидетельствует о наличии в питании эвгленовых и хризифитовых водорослей [12], и о собственном синтезе рыбами этой кислоты из биохимического предшественника – ЭПК. Способность Карпообразных к синтезу ДГК из незаменимых ЖК, получаемых с пищей, была доказана в последние годы [14, 15]. Также заметную долю в общих ЖК растительноядной формы *O. potanini* из обоих водохранилищ составляют биомаркеры бактерий: 15:0, 15–17РЖК (жирные кислоты с разветвленной цепью), 17:0 и $\Sigma 17:1$ [16], что свидетельствует и об их наличии в рационе этих рыб. Следует отметить, что уровни биомаркеров бактерий, 15–17РЖК и 17:0 были достоверно выше у рыб в Дургунском водохранилище, тогда как уровень ЭПК (биомаркера диатомей), напротив, был выше у алтайского османа Потанина Тайширского водохранилища (табл. 1). Вероятно, вышеупомянутые различия свидетельствуют о более высоком

вкладе в основание пищевых сетей экосистем бактерий (детрита) в Дургунском водохранилище и водорослей – в Тайширском водохранилище.

Среднее суммарное содержание ЭПК+ДГК в мышечной ткани (съедобной биомассе) растительной формы алтайского османа Потанина в обоих водохранилищах достоверно не отличалось и составляло около 1 мг на г сырой массы (табл. 1). Подобная величина содержания ЭПК+ДГК соответствует медианной величине для отряда Карпообразных [3]. То есть, питательная ценность алтайского

османа Потанина для человека совпадает с таковой у других рыб данного отряда.

Анализ стабильных изотопов в мышцах растительной формы алтайского османа Потанина показал существенные различия между рыбами двух водохранилищ (рис. 1).

Наблюдаемые достоверно более высокие величины содержания тяжелого изотопа азота в мышцах *O. potanini* из Тайширского водохранилища, возможно, связаны как с особенностями этого водоема (не сформировавшихся еще бентосных сообществ, слабым развитием макрофитов), так и с незавершившейся диверсификацией речной формы алтайского османа Потанина в озерные формы. О последнем свидетельствуют данные, полученные путем анализа кишечных трактов ортодоксальными методами. В Тайширском водохранилище у *O. potanini*, отнесенных к растительной форме, наблюдалось преобладание в питании личинок насекомых, при небольшом (по частоте встречаемости 16,1%) присутствии растительной пищи [9]. Действительно, полученные данные по средним величинам $\delta^{15}\text{N}$ косвенно подтверждают большую долю животной пищи у алтайского османа Потанина из Тайширского водохранилища (рис. 1).

Таким образом, впервые исследованы состав и содержание жирных кислот в мышечной ткани *O. potanini*. Установлено, что основу пищевой сети

Таблица. Состав жирных кислот (ЖК, % от общей суммы, среднее значение $\pm$ стандартная ошибка) и содержание (мг г⁻¹ сырой массы) общей суммы ЖК, а также эйкозапентаеновой (ЭПК) и докозагексаеновой (ДГК) кислот и их суммы в мышечной ткани растительной формы *Oreoleuciscus potanini* из Тайширского (число проб n = 10) и Дургунского водохранилищ (n = 6) в августе 2023 г.; t – критерий Стьюдента, достоверные различия (p<0.05) выделены жирным шрифтом

ЖК	Тайширское	Дургунское	t
12:0	0.2 $\pm$ 0.1	0.2 $\pm$ 0.0	0.68
14:0	1.6 $\pm$ 0.6	1.2 $\pm$ 0.3	0.91
15:0	0.4 $\pm$ 0.1	0.5 $\pm$ 0.1	0.70
16:0	17.5 $\pm$ 1.5	17.2 $\pm$ 1.1	0.28
16:1n-9	0.5 $\pm$ 0.2	0.7 $\pm$ 0.1	1.51
16:1n-7	6.2 $\pm$ 1.7	5.5 $\pm$ 1.2	0.47
15-17РЖК*	1.4 $\pm$ 0.8	2.4 $\pm$ 0.4	2.57
Σ 16ПНЖК	0.4 $\pm$ 0.6	0.3 $\pm$ 0.2	0.39
17:0	0.6 $\pm$ 0.1	0.9 $\pm$ 0.1	4.03
Σ 17:1	0.5 $\pm$ 0.0	0.6 $\pm$ 0.1	0.57
18:0	7.0 $\pm$ 0.6	8.4 $\pm$ 1.1	1.13
18:1n-9	9.2 $\pm$ 1.3	9.2 $\pm$ 0.8	0.04
18:1n-7	6.8 $\pm$ 0.7	6.5 $\pm$ 0.6	0.30
18:2n-6	4.1 $\pm$ 1.4	2.5 $\pm$ 0.3	1.84
18:3n-3	1.4 $\pm$ 0.6	1.4 $\pm$ 0.5	0.00
18:4n-3	0.4 $\pm$ 0.2	0.3 $\pm$ 0.1	0.15
20:0	0.1 $\pm$ 0.1	0.1 $\pm$ 0.0	0.52
Σ 20:1	0.7 $\pm$ 0.4	0.7 $\pm$ 0.2	0.15
20:2n-6	0.6 $\pm$ 0.1	0.7 $\pm$ 0.0	0.11
20:4n-6	7.0 $\pm$ 0.1	9.6 $\pm$ 1.2	1.84
20:4n-3	0.8 $\pm$ 0.1	0.5 $\pm$ 0.1	1.38
20:5n-3	9.3 $\pm$ 0.9	7.0 $\pm$ 0.4	2.36
22:4n-6	0.4 $\pm$ 0.1	0.6 $\pm$ 0.1	1.93
22:5n-6	0.9 $\pm$ 0.0	1.9 $\pm$ 0.1	4.43
22:5n-3	3.8 $\pm$ 0.0	3.2 $\pm$ 0.2	1.94
22:6n-3	16.2 $\pm$ 0.1	16.2 $\pm$ 1.6	0.01
Сумма, мг г ⁻¹	4.42 $\pm$ 0.51	4.51 $\pm$ 1.96	0.05
ЭПК	0.41 $\pm$ 0.06	0.29 $\pm$ 0.12	0.89
ДГК	0.66 $\pm$ 0.06	0.59 $\pm$ 0.23	0.30
ЭПК+ДГК	1.07 $\pm$ 0.09	0.88 $\pm$ 0.35	0.53

*кислоты с разветвленной цепью.

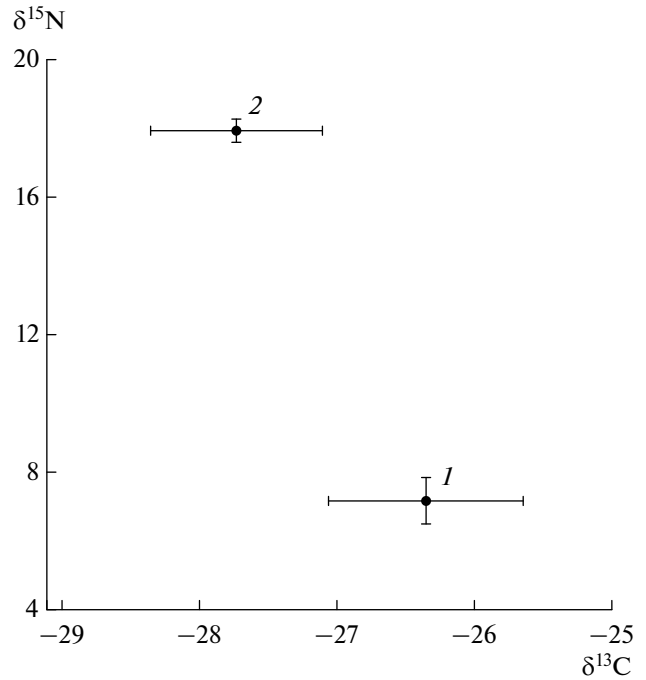


Рис. 1. Содержание стабильных изотопов в Алтайских османах Потанина *Oreoleuciscus potanini* из водохранилищ Монголии в августе 2023 г.: 1 – Дургунское водохранилище; 2 – Тайширское водохранилище. Отрезки прямых обозначают стандартные ошибки средних.

растительной формы данного вида составляют микроводоросли: диатомеи, эвглены и, возможно, хризифиты, а также бактерии. Содержание ЭПК и ДГК — протекторов сердечно-сосудистых заболеваний человека в съедобной биомассе алтайского османа Потанина соответствует медианному значению этой величины в отряде Карпообразных.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена за счет Государственного задания ИПЭЭ РАН № 0109-2018-0076 и Государственного задания Института биофизики СО РАН № FWES-2024-0024. Материал собран в рамках работы Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ. Авторы искренне благодарны начальнику экспедиции С.Н. Баже за содействие в организации работ в Монголии.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ И СТАНДАРТОВ

Одобрено Институциональным комитетом по этике животных по биомедицинской этике Сибирского федерального университета (Россия). Госстандарт РФ, 33215-2014, 01.07.2016. Код одобрения: Государственный стандарт РФ № 33215-2014.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tocher D.R., Betancor M.B., Sprague M. et al.* Omega-3 long-chain polyunsaturated fatty acids, EPA and DHA: bridging the gap between supply and demand // *Nutrients*. 2019. V. 11. № 1. Article 89.
2. *Bernasconi A.A., Wiest M.M., Lavie C.J. et al.* Effect of omega-3 dosage on cardiovascular outcomes: an updated meta-analysis and meta-regression of interventional trials // *Mayo Clin. Proc.* 2021. V. 96. № 2. P. 304–313.
3. *Gladyshev M.I., Sushchik N.N., Tolomeev A.P., Dgebuadze Y.Y.* Meta-analysis of factors associated with omega-3 fatty acid contents of wild fish. // *Rev. Fish Biol. Fish.* 2018. V. 28. P. 277–299.
4. *Harris W.S., Mozaffarian D., Lefevre M. et al.* Towards establishing dietary reference intakes for eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids. // *J. Nutr.* 2009. V. 139. P. 804S–819S.
5. *Cladis D.P., Kleiner A.C., Freiser H.H., Santerre C.R.* Fatty acid profiles of commercially available finfish fillets in the United States. // *Lipids*. 2014. V. 49. P. 1005–1018.
6. *Dgebuadze Yu., Mendsaihan B., Dulmaa A.* Diversity and distribution of Mongolian fish: Recent state, trends and studies // *Erforsch. Biol. Ress. Mongolei. Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg, (Halle/Saale)* 2012. V. 12: 219–230.
7. *Бульон В.В., Никулина В.Н., Степанова В.А., Цаголихин С.Я., Цэревсамбуу С.* Экосистемы водоемов Центрально-азиатского бассейна // В кн. В кн.: Рыбы Монгольской Народной Республики. М.: Наука, 1983. С. 69–101.
8. *Dgebuadze Yu. Yu.* Central Asian Closed Basin: Unique place of cyclic diversification of fish // *Ecosystems of Central Asia under current conditions of socio-economic development. Proceedings of the international conference*. 2015, Ulaanbaatar, Mongolia. General and Experimental Biology MAS. V 2: 29–33.
9. Водохранилища полупустынной зоны: Западная Монголия / отв. ред. Крылов А.В. — Москва; Ярославль: Филигрань, 2023. — 204 с.; ил. — Биологические ресурсы и природные условия Монголии: Труды Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ; т. 69. ISBN 978-5-6050859-8-0
10. *Gladyshev M.I., Kolmakova O.V., Tolomeev A.P., Anishchenko O.V., Makhutova O.N., Kolmakova A.A., Kravchuk E.S., Glushchenko L.A., Kolmakov V.I., Sushchik N.N.* Differences in organic matter and bacterioplankton between sections of the largest Arctic river: Mosaic or continuum? // *Limnology and Oceanography*. — 2015. — 60. — P. 1314–1331. doi: 10.1002/lno.10097
11. *Dijkman N.A., Kromkamp J.C.* Phospholipid-derived fatty acids as chemotaxonomic markers for phytoplankton: Application for inferring phytoplankton composition // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2006. V. 324. P. 113–125.
12. *Taipale S., Strandberg U., Peltomaa E., Galloway A.W.E., Ojala A., Brett M.T.* Fatty acid composition as biomarkers of freshwater microalgae: analysis of 37 strains of microalgae in 22 genera and in seven classes. // *Aquat. Microb. Ecol.* 2013. V. 71. P. 165–178.
13. *Kelly J.R., Scheibling R.E.* Fatty acids as dietary tracers in benthic food webs. // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* V. 446. P. 1–22.
14. *Sun S., Ren T., Li X., Cao X., Gao J.* Polyunsaturated fatty acids synthesized by freshwater fish: A new insight to the roles of *elovl2* and *elovl5* in vivo. // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2020. V. 532. P. 414–419.
15. *Marrero M., Monroig O., Carlos Navarro J., et al.* Metabolic and molecular evidence for long-chain PUFA biosynthesis capacity in the grass carp *Ctenopharyngodon idella*. // *Compar. Biochem. Physiol. A*. 2022. V. 270. Article 111232.
16. *Napolitano G.E.* Fatty acids as trophic and chemical markers in freshwater ecosystems In: *Arts M.T., Wainman B.C.*, Eds. *Lipids in Freshwater Ecosystems*, Springer, New York, 1999, pp. 21–44.

**COMPOSITION AND CONTENT OF FATTY ACIDS
IN MUSCLE TISSUE OF THE POTANIN ALTAI OSMAN
OREOLEUCISCUS POTANINI (CYPRINIFORMES, ACTINOPTERIGII)
FROM MONGOLIAN RESERVOIRS**

**Academician of the RAS Yu. Yu. Dgebuadze^{1, #},
Corresponding Member of the RAS N. N. Sushchik^{2, 3}, B. Mendsaikhan⁴,
D. Altansukh⁵, A. Y. Emelianova², Corresponding Member of the RAS M. I. Gladyshev^{2, 3}**

¹*Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Biophysics, Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center," Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

³*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

⁴*Institute of Geography and Geoecology of Mongolian Academy of Sciences, Ulanbaatar-15170, Mongolia*

⁵*Western Regional Branch of National University of Mongolia*

[#]*e-mail: yudgeb@yandex.ru*

The composition of fatty acids in the muscle tissue of the unique Central Asian carp-like fish of the Potanin Altai osman *Oreoleuciscus potanini* was studied for the first time. The populations of these fish in the reservoirs of the semi-desert zone (Durgun and Taishir) during the period of their formation are considered. It was shown that the content of eicosapentaenoic (EPA) and docosahexaenoic (DHA) acids in *O. potanini* corresponds to the median value of this value in the order Cypriniformes. It has been established that the basis of the food web of the herbivorous form of this species consists of microalgae: diatoms, euglens and, possibly, chrysophytes, as well as bacteria. At the same time, the levels of bacterial biomarkers, 15–17BFA and 17:0 were significantly higher in fish in the Durgun reservoir, and the level of EPA (diatom biomarker) in *O. potanini* in the Taishir reservoir. The established higher values of the heavy nitrogen isotope content in the muscles of *O. potanini* from the Taishir reservoir are most likely associated with not yet formed benthic communities and with the incomplete diversification of the river form of the Potanin Altai Osman into lacustrine forms.

Keywords: eicosapentaenoic acid (EPA), docosahexaenoic acid (DHA), stable isotopes, *Oreoleuciscus potanini*, reservoirs, food webs