

СВЕТЛАНА АЛЕКСАНДРОВНА МУРЗИНА

кандидат биологических наук, заведующий лабораторией экологической биохимии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)

murzina.svetlana@gmail.com

ЗИНАИДА АНАТОЛЬЕВНА НЕФЕДОВА

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)

znefed@krc.karelia.ru

СВЕТЛАНА НИКОЛАЕВНА ПЕККОЕВА

младший научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)

pek-svetlana@mail.ru

ТАТЬЯНА РУДОЛЬФОВНА РУОКОЛАЙНЕН

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)

truok@krc.karelia.ru

НИНА НИКОЛАЕВНА НЕМОВА

доктор биологических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории экологической биохимии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук (Петрозаводск, Российская Федерация)

nemova@krc.karelia.ru

СОДЕРЖАНИЕ ЛИПИДНЫХ КОМПОНЕНТОВ У МОЛОДИ КУМЖИ *SALMO TRUTTA* L.

ИЗ РЕКИ ОРЗЕГА (БАССЕЙН ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА):

II. ДИНАМИКА УРОВНЯ ЛИПИДОВ В МАЛЬКОВОМ ПЕРИОДЕ РАЗВИТИЯ*

Исследован липидный статус молоди кумжи (возраст 1+, 2+, 3+) из реки Орзега (бассейн Онежского озера) в летний период. Установлен высокий рост содержания запасных ТАГ и ЭХС, а также ХС и индексов соотношения ТАГ/ФЛ и ТАГ+ЭХС/ФЛ+ХС у молоди кумжи возрастных групп 2+ и 3+, что свидетельствует о повышении интенсивности питания и, как следствие, увеличении энергетического потенциала рыб. Обнаружена положительная корреляция липидного статуса с размерно-весовыми характеристиками. Так, вес молоди 2+ и 3+ увеличился в 3,6 и 6,8 раза соответственно по сравнению с таковым у молоди возраста 1+. Рост уровня липидов у молоди кумжи (2+, 3+) является одним из биохимических показателей, связанных с изменением метаболических процессов в результате влияния возрастных и трофоэкологических факторов, которые определяют адаптационные возможности роста и развития исследуемых рыб. Результаты исследований липидного статуса молоди кумжи позволяют рассматривать их в качестве биохимических индикаторов в мониторинге роста и раннего развития кумжи в реке Орзега.

Ключевые слова: молодь кумжи, раннее развитие, структурные и энергетические липиды

ВВЕДЕНИЕ

Ранее нами [4] была показана динамика жирнокислотного состава общих липидов у молоди кумжи разных возрастных групп (1+, 2+, 3+) из реки Орзега (бассейн Онежского озера) и продемонстрирована значимость отдельных жирных

кислот и их отношений в оценке физиологического состояния молоди. Также установлена возможность использования этих биохимических индексов в качестве индикаторов наличия или отсутствия миграции в жизненном цикле кумжи, соответственно «жилой» или мигрирующей формы.

Кроме того, характеристика липидного статуса молоди лососевых видов рыб является важной составляющей при решении проблемы физиолого-биохимической индикации состояния организмов и популяций на протяжении жизненного цикла (а также отдельных периодов). Известно, что липидные компоненты (особенно триацилглицерины и жирные кислоты) сравнительно быстро реагируют на стрессовые ситуации различного характера, в том числе на изменение состояния метаболизма возрастного периода. Липиды выступают прежде всего в роли запасных веществ, особенно в условиях низкой температуры, сезонных колебаний светового режима, изменений уровня воды, скоростей течения в реках и ручьях в отдельные сезоны года.

Одним из широко распространенных представителей семейства лососевых является кумжа *Salmo trutta* L., которая обитает в малом водотоке Онежского озера – реке Орзега, типичном кумжевом биотопе. В данной реке складывается комплекс благоприятных трофоэкологических условий в разных стациях водотока, которые активно осваиваются молодью, что способствует их активному росту. Молоди лососевых свойственно активное избиение определенных видов пищевых организмов, что и определяет особенности их липидного состава. Показано [9], что кумжа растет лучше по сравнению с лососем в притоках бассейна Онежского озера.

Изучена возрастная динамика липидного статуса (состояние комплекса показателей липидного обмена) у молоди кумжи (возраста 1+, 2+ и 3+) в реке Орзега (бассейн Онежского озера).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Липидный статус молоди кумжи (1+, 2+ и 3+) индивидуально оценивали по содержанию общих липидов (ОЛ), фосфолипидов (ФЛ) и их классов – фосфатидилхолина (ФХ), фосфатидилэтаноламина (ФЭА), фосфатидилсерина (ФС), фосфатидилинозитола (ФИ), лизофосфатидилхолина (ЛФХ), сфингомиелина (СФМ), а также триацилглицеринов (ТАГ), холестерина (ХС), эфиров холестерина (ЭХС).

Получение материала и количественный анализ липидов, а также статистическая обработка данных описаны в опубликованных ранее работах [3].

Исследования проведены на базе лаборатории экологической биохимии с использованием научного оборудования центра коллективного пользования «Комплексные фундаментальные и прикладные исследования особенностей функционирования живых систем в условиях Севера» (ЦКП ИБ КарНЦ РАН).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований липидного статуса молоди (1+, 2+, 3+) кумжи из реки Орзега в лет-

ний период (июнь) свидетельствуют о низком содержании общих липидов (9,51 % сухой массы) у молоди (1+), которое увеличилось с возрастом (2+, 3+) более чем в два раза (до 22,36 % сухой массы), особенно у мальков возраста 2+ (таблица). Увеличение содержания общих липидов произошло в основном за счет запасных компонентов – ТАГ и ЭХС, а также ХС, в результате чего значения индексов ТАГ+ЭХС/ФЛ+ХС и ХС/ФЛ с возрастом увеличилось (от 0,16 до 0,68 и от 0,70 до 1,91 соответственно). Значительное повышение содержания запасных липидов – ТАГ и ЭХС (более чем в 5,0 и 6,0 раза соответственно), а также показателей соотношения липидов у молоди 2+ и 3+ по сравнению с таковыми у молоди 1+ положительно коррелирует с ростом их размерно-весовых характеристик (особенно у молоди 2+) (см. таблицу).

У молоди 1+ в составе общих липидов доминировали ФЛ, уровень которых с возрастом достоверно не изменился (4,62–5,61 % от сухой массы), как и доля отдельных ФЛ классов (ФИ, ФС, ФЭА, ФХ, ЛФХ и СФМ). Однако следует отметить, что у молоди 2+ и 3+ обнаруженные вариации ФЛ недостоверны: у молоди 2+ содержание ФЛ несколько повышается, что относится и к отдельным классам (ФЭА, ФХ, ЛФХ и СФМ), а у молоди 3+ они снижаются.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно, что каждый из этапов онтогенеза рыб характеризуется определенной морфологической и физиолого-биохимической спецификой организма и отношениями со средой [5].

Рост уровня запасных липидов (ТАГ и ЭХС) у старшей молоди (2+, 3+) кумжи, особенно в возрасте 2+, обитающей в реке Орзега, может быть связан с видовой спецификой кормовых объектов и их массовостью, возможностью потребления рыбой, а также степенью интенсивности метаболизма в разные возрастные периоды жизни мальков. Ранее нами было установлено повышение доли эссенциальных 18:2(n-6) и 18:3(n-3) кислот у молоди 2+ и 3+ кумжи из р. Орзега [4], которое положительно коррелирует с ростом уровня ТАГ и ЭХС, что свидетельствует о запасании этих пищевых кислот в составе энергетических липидов мальков.

Известно, что молодь лососевых рыб в разном возрасте избирает различные участки обитания в одном биотопе [10], что и определяет видовую специфику пищевых объектов, их обилие, доступность и влияет на уровень накопления и активность метаболизма липидов. Существует соответствие между размерами рыбы и размерами пищевых объектов, что также влияет на качественный пищевой спектр молоди лососевых разных возрастов [9].

Значительный рост содержания запасных ТАГ и ЭХС, а также показателей ТАГ/ФЛ и ТАГ+ЭХС/

Содержание липидных компонентов (% сухой массы) у разновозрастной кумжи (+1, +2, +3) из реки Орзега. Сбор проб: 29.06.2016 г.

Показатель	Возраст		
	1+	2+	3+
n	5	9	5
Длина, см	7,75 ± 0,45	11,47 ± 0,16*	13,86 ± 0,24* [^]
Вес, г	4,06 ± 0,53	14,57 ± 0,69*	27,50 ± 1,60* [^]
ОЛ	9,51 ± 0,79	22,36 ± 2,08*	19,43 ± 2,07*
ФЛ	4,82 ± 0,38	5,61 ± 0,50	4,62 ± 0,68
ТАГ	1,21 ± 0,39	6,64 ± 0,97*	7,05 ± 1,72*
ЭХС	0,14 ± 0,11	0,88 ± 0,21*	0,85 ± 0,27*
ХС	3,35 ± 0,09	9,24 ± 2,02*	6,92 ± 1,03*
ФИ	0,11 ± 0,05	0,07 ± 0,01	0,08 ± 0,03
ФС	0,17 ± 0,05	0,14 ± 0,01	0,12 ± 0,03
ФЭА	0,96 ± 0,46	1,15 ± 0,13	0,91 ± 0,20
ФХ	2,77 ± 0,20	3,06 ± 0,28	2,43 ± 0,41
ЛФХ	0,58 ± 0,23	0,91 ± 0,10	0,81 ± 0,16
СФМ	0,17 ± 0,04	0,26 ± 0,03	0,25 ± 0,04
ТАГ+ЭХС/ФЛ+ХС	0,16 ± 0,06	0,51 ± 0,07*	0,68 ± 0,07*
ХС/ФЛ	0,70 ± 0,07	1,91 ± 0,58*	1,62 ± 0,33*
ТАГ/ФЛ	0,25 ± 0,06	1,24 ± 0,23*	1,78 ± 0,52*

Примечание. Значения представлены в виде: $M \pm m$, n – число проб, ОЛ – общие липиды, ФЛ – фосфолипиды, ФИ – фосфатидилинозитол, ФС – фосфатидилсерин, ФЭА – фосфатидилэтаноламин, ФХ – фосфатидилхолин, ЛФХ – лизофосфатидилхолин, СФМ – сфингомиелин, ТАГ – триацилглицерины, ЭХС – эфиры холестерина, ХС – холестерин. * – различия от возраста 1+ достоверны ($p \leq 0,05$); [^] – различия от возраста 2+ достоверны ($p \leq 0,05$).

ФЛ+ХС у молоди (2+ и 3+) свидетельствует о повышении интенсивности питания и как следствие – увеличении энергетического потенциала рыб, что положительно коррелирует с ростом их размерно-весовых характеристик (вес увеличился в 3,6 и 6,8 раза соответственно) по сравнению с таковыми у молоди (1+). Триацилглицерины (ТАГ) являются одной из универсальных запасных форм липидов и в значительной степени используются организмом как основной энергетический источник при увеличении уровня аэробного метаболизма в определенные возрастные периоды. Ранее нами была исследована структура кормовой базы реки Орзега и установлена высокая доля личинок ручейников *Rhyacophila nubile* (по биомассе – 28,0 %, в питании рыб – 12,0 %). В составе их липидов доминировали запасные ТАГ, которые составляли 6,68 % сухой массы, индекс соотношения ТАГ/ФЛ – 1,83 [2]. Эти показатели имеют близкие значения с таковыми у мальков кумжи возрастных групп 2+ и 3+.

Повышение уровня ХС и показателя ХС/ФЛ (более чем в 2,8 раза) у молоди 2+, возможно, связано не только с регуляцией микровязкости биомембран, но и с поступлением его с кормом, а также с активацией его биосинтеза в печени в ответ на активное питание и образование желчных кислот (из ХС) для процесса пищеварения [1], [6], [11]. При этом важное значение имеет пищевой

спектр кормовых объектов с разным уровнем липидов и липотропных веществ.

Избыточное количество ХС может эстерифицироваться, образуя депо клеточного ХС и жирной кислоты в виде ЭХС [8], уровень которых также увеличился у молоди (2+ и 3+) кумжи. При этом ЭХС являются более универсальными запасными веществами, чем ТАГ [7]. В данный период исследования (июнь) температура воды повышалась до +13,5 °C, что благоприятствовало интенсивному развитию кормовых объектов и активизации питания молоди кумжи (2+, 3+), которое положительно коррелирует с ростом их размерно-весовых характеристик. Вариации значений ХЛ/ФЛ являются одним из путей регуляции микровязкости биомембран, которые связаны не только с активностью биосинтеза ХС в печени, но и с физиолого-биохимическими особенностями рыб, обеспечивающими реализацию возрастных физиологических функций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлен высокий рост содержания запасных ТАГ и ЭХС, а также ХС и индексов соотношения ТАГ/ФЛ и ТАГ+ЭХС/ФЛ+ХС у молоди кумжи (2+ и 3+), что свидетельствует, скорее всего, о повышении интенсивности питания и как следствие – увеличении энергетического потенциала рыб. Показана положительная корреля-

ция содержания липидов, главным образом TAG и ЭХС, с размерно-весовыми характеристиками молоди. Вес мальков возраста 2+ и 3+ увеличился в 3,6 и 6,8 раза соответственно по сравнению с таковыми младшей возрастной группы (1+).

Рост уровня липидов у молоди кумжи (2+, 3+) является одним из биохимических показателей, связанных с изменением метаболических процессов в результате влияния возрастных и экологических факторов, которые обеспечивают адаптационные возможности их роста и развития. Результаты исследований липидного статуса молоди кумжи позволяют рассматри-

вать их в качестве биохимических индикаторов в мониторинге роста и раннего развития в реке Орзега – типичном кумжевом водотоке, а также отслеживать особенности миграционного поведения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы работы выражают благодарность сотрудникам лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных ИБ КарНЦ РАН – д. б. н., проф. А. Е. Веселову, а также к. б. н. Д. А. Ефремову, М. А. Ручьеву за сбор материала для исследования.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 14-24-00102 «Лососевые рыбы Северо-Запада России: эколого-биохимические механизмы раннего развития».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лопухин Ю. М., Арчаков А. И., Владимиров Ю. А., Коган Э. М. Холестериноз. М.: Медицина, 1985. 350 с.
- Мурзина С. А., Нефедова З. А., Пеккоева С. Н., Веселов А. Е., Барышев И. А., Рипатти П. О., Немова Н. Н. Содержание жирных кислот в кормовых объектах молоди лососевых рыб из рек бассейна Онежского озера // Биология внутренних вод. (В печати.)
- Нефедова З. А., Мурзина С. А., Веселов А. Е., Пеккоева С. Н., Руоколайнен Т. Р., Ручьев М. А., Немова Н. Н. Биохимическая разнокачественность по липидному статусу молоди кумжи *Salmo trutta* L., обитающей в реках бассейна Белого моря // Известия РАН. Серия Биологическая. 2017. № 1. С. 57–62.
- Нефедова З. А., Мурзина С. А., Пеккоева С. Н., Немова Н. Н. Содержание липидных компонентов у молоди кумжи *Salmo trutta* L. из реки Орзега (бассейн Онежского озера): I. Динамика жирнокислотного состава в процессе роста и развития молоди (1+, 2+, 3+) кумжи // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2017. № 4 (165). С. 7–13.
- Новиков Г. Г. Рост и энергетика развития костистых рыб в раннем онтогенезе. М.: Эдиториал УРСС, 2000. 296 с.
- Перевозчиков А. П. Стеролы и их транспорт в развитии животных // Онтогенез. 2008. Т. 39. № 3. С. 165–189.
- Полякова Э. Д. Регуляция содержания холестерина в клетке // Биохимия липидов и их роль в обмене веществ. М.: Наука, 1981. С. 120–127.
- Саутин Ю. Ю. Проблема регуляции адаптационных изменений липогенеза, липолиза и транспорта липидов у рыб // Успехи современной биологии. 1989. Т. 107. Вып. 1. С. 131–147.
- Шустов Ю. А. Особенности роста молоди кумжи *Salmo trutta* L. в водоемах европейского севера России // Труды Карельского научного центра РАН. 2012. С. 94–101.
- Fausch K. D. Experimental analysis of salmonid microhabitat selection in streams // Develop. Ecol. Perspect. 21st Cent.: Abstr. 5th Intern. Congr. Ecol. Yokohama, 1990. P. 35.
- Mouritsen O. G., Zuckermann M. What is so special about cholesterol? // Lipids. 2004. № 39. P. 1101–1113.

Murzina S. A., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Nefedova Z. A., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Pekkoeva S. N., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Ruokolainen T. R., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Nemova N. N., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

THE CONTENT OF LIPID COMPONENTS IN JUVENILES OF *SALMO TRUTTA* L. FROM THE ORZEGA RIVER (ONEGA LAKE BASIN): II. DYNAMICS OF THE LEVEL OF LIPIDS IN THE JUVENILE PERIOD OF DEVELOPMENT

During the summer period, the lipid status in juveniles of brown trout (at 1+, 2+, 3+ years old) from the Orzega River (Onega Lake Basin) was studied. The high growth of the content of reserve lipids – TAG and ECHOL, and the increased level of cholesterol and indices of TAG/FL and TAG+ECHOL/FL+CHOL in juveniles of brown trout at the age of 2+ and 3+ years old was registered. The obtained results indicate the increase in the intensity of food consumption and, consequently, the increase in the energy potential of the fish in focus. The positive correlation of the lipid content with the size and weight characteristics was registered. Thus, the weight of the studied youngsters at the age of 2+ and 3+ years old increased by 3,6 and 6,8 times when compared with correlations for juveniles at the age of 1+. The growth of the lipid levels in juveniles of brown trout (2+, 3+) is one of the biochemical indicators associated with changes in metabolic processes due to the influence of the growth and trophic and ecological factors. Such changes determine the level of adaptive possibilities of the growth and development in the studied fish. The results of the research on the

lipid content in juveniles of brown trout can be considered biochemical indicators in monitoring the growth and early development of brown trout from the Orzega River.

Key words: juvenile brown trout, early development, structural and energy lipids

REFERENCES

1. Lopukhin Yu. M., Archakov A. I., Vladimirov Yu. A., Kogan E. M. *Kholesterinoz* [Cholesterol]. Moscow, Meditsina Publ., 1985. 350 p.
2. Murzina S. A., Nefedova Z. A., Pekkoeva S. N., Veselov A. E., Baryshev I. A., Ripatti P. O., Nemova N. N. The content of fatty acids in forage objects of juveniles of salmonids from rivers of Onega Lake Basin [Soderzhanie zhirnykh kislot v kormovykh ob'ektakh molodi lososevykh ryb iz rek basseyna Onezhskogo ozera]. *Biologiya vnutrennikh vod*. (In press.)
3. Nefedova Z. A., Murzina S. A., Veselov A. E., Pekkoeva S. N., Ruokolainen T. R., Ruch'ev M. A., Nemova N. N. The biochemical variability of the lipid status of juveniles of the brown *Salmo trutta* L., inhabiting rivers, belonging to the watershed area of the White Sea Basin [Biokhimicheskaya raznokachestvennost' po lipidnomu statusu molodi kumzhi *Salmo trutta* L., obitayushchey v rekakh basseyna Belogo morya]. *Izvestiya RAN. Seriya Biologicheskaya*. 2017. № 1. P. 57–62.
4. Nefedova Z. A., Murzina S. A., Pekkoeva S. N., Nemova N. N. Content of lipid components of juveniles of *Salmo trutta* L. from the Orzega river: I. Dynamics of fatty acids during growth and development of juveniles brown trout (at 1+, 2+, 3+ age) [Soderzhanie lipidnykh komponentov u molodi kumzhi *Salmo trutta* L. iz reki Orzega (basseyn Onezhskogo ozera): I. Dinamika zhirnokislotnogo sostava v protsesse rosta i razvitiya molodi (1+, 2+, 3+) kumzhi]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University]. 2017. № 4 (165). P. 7–13.
5. Novikov G. G. *Rost i energetika razvitiya kostistykh ryb v rannem ontogeneze* [Growth and energy development of teleost's fish in early ontogeny]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2000. 296 p.
6. Perevozchikov A. P. Sterols and their transport in the development of animals [Steroly i ikh transport v razvitiu zhivotnykh]. *Ontogenet.* 2008. Vol. 39. № 3. P. 165–189.
7. Polyakova E. D. Regulation of cholesterol in the cell [Regulyatsiya soderzhaniya kholesterina v kletke]. *Biokhimiya lipidov i ikh rol' v obmene veshchestv*. Moscow, Nauka Publ., 1981. P. 120–127.
8. Sautin Yu. Yu. The problem of regulation of adaptive changes in lipogenesis, lipolysis and lipid transport in fish [Problema reguljatsii adaptatsionnykh izmeneniy lipogeneza, lipoliza i transporta lipidov u ryb]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 1989. Vol. 107. Issue 1. P. 131–147.
9. Shustov Yu. A. Features of growth of young *Salmo trutta* L. in water bodies of the European North of Russia [Osobennosti rosta molodi kumzhi *Salmo trutta* L. v vodoemakh evropeyskogo severa Rossii]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*. 2012. P. 94–101.
10. Fausch K. D. Experimental analysis of salmonid microhabitat selection in streams. *Develop. Ecol. Perspect. 21st Cent.: Abstr. 5th Intern. Congr. Ecol.* Yokohama, 1990. P. 35.
11. Mouritsen O. G., Zuckerman M. What is so special about cholesterol? *Lipids*. 2004. № 39. P. 1101–1113.

Поступила в редакцию 25.07.2017