

УДК 597.5

ВЫСОКАЯ ВНУТРИВИДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА АЗОТА МЫШЦ У РЫБ РОДА *Cyprinion* (*Cyprinidae*) БЛИЖНЕГО ВОСТОКА

© 2024 г. Б. А. Лёвин^{a, b, *}, Дж. Кайя^c, А. С. Комарова^{a, b}, М. А. Лёвина^{a, d}, О. Л. Розанова^b, А. В. Тиунов^b

^aИнститут биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,

пос. Борок, Некоузский р-н, Ярославская обл., Россия

^bИнститут проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской академии наук, Москва, Россия

^cУниверситет Реджепа Тайипа Эрдогана, Ризе, Турция

^dЧереповецкий государственный университет, Череповец, Вологодская обл., Россия

*e-mail: borislyovin@gmail.com

Поступила в редакцию 17.11.2023 г

После доработки 10.07.2024 г.

Принята к публикации 12.07.2024 г.

В выборках трех видов карловых рыб, *Cyprinion macrostomus* (перифитонофаг), *Cyprinion kais* (бентофаг) и *Luciobarbus schejch* (вседядный), собранных в небольшом притоке верхнего течения р. Тигр (Турция), обнаружена значительная изменчивость изотопного состава азота и углерода (величин $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$) в тканях белых мышц. Исключительно низкое значение (1.7‰) и аномально широкая внутривидовая изменчивость (от 1.7 до 15.8‰) величины $\delta^{15}\text{N}$ отмечены в тканях перифитонофага *C. macrostomus*. Все особи были собраны синхронно на одной станции, однако широкий диапазон внутривидовой изменчивости величин $\delta^{15}\text{N}$ говорит о гетерогенности выборки и участии разных процессов в формировании изотопного состава тканей рыб. Исследованный водоток находится в зоне земледелия с интенсивной химизацией и загрязнением реки подвижными формами азота, что могло быть причиной понижения величины $\delta^{15}\text{N}$ у рыб-резидентов малой реки. Более высокие (близкие к ожидаемым) величины $\delta^{15}\text{N}$, вероятно, свойственны особям, недавно мигрировавшим из более крупного водотока для нереста. Роль загрязнения водных экосистем и миграций могут недоучитываться в исследованиях трофической экологии рыб с применением изотопного анализа.

Ключевые слова: стабильные изотопы углерода и азота, трофические отношения, антропогенное загрязнение, лотические экосистемы

DOI: 10.31857/S0320965224060134, **EDN:** WWWYOU

ВВЕДЕНИЕ

Анализ соотношения стабильных изотопов в тканях живых организмов успешно применяется при изучении трофической экологии отдельных видов и пищевых сетей как в наземных, так и водных экосистемах (Vanderklift, Ponsard, 2003; Gladyshev, 2009; Boecklen et al., 2011; Potapov et al., 2019). Чаще всего для этих целей используют изотопный состав азота (соотношение $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, или величина $\delta^{15}\text{N}$) и углерода (соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, или величина $\delta^{13}\text{C}$). Метод используется как дополнение к классическим и молекулярным методам изучения питания, так и в качестве независимого инструмента определения трофических ниш организмов и видов. Этому способствует

невысокая скорость обмена макроэлементов, составляющая для позвоночных несколько недель или месяцев в зависимости от типа ткани или органа. В частности, у карловых рыб “изотопное равновесие” с пищей может быть достигнуто в течение 5–6 мес. в мышечных тканях, а период полувыведения азота составляет ~1.5 мес. (Winter et al., 2019). Таким образом, анализ соотношения стабильных изотопов может служить в качестве интегрального показателя преобладающего рациона или типа питания за весьма длительный период времени. Фактически, введен термин “изотопная ниша” (Newsome et al., 2007). Особенно информативен изотопный состав азота, поскольку тяжелый азот (^{15}N) закономерно накапливается



Рис. 1. Станция сбора материала на р. Акчай (Akçayır), притоке р. Батман (Batman) в бассейне р. Тигр, провинция Диарбакыр (Diyarbakır), Турция.

в пищевых сетях, в силу чего по величине $\delta^{15}\text{N}$ можно определить трофическую позицию организма (McCutchan et al., 2003; Vanderklift, Ponsard, 2003).

Несмотря на большой опыт использования изотопного состава гидробионтов в трофической экологии, сведения об изотопном составе рыб в разных экосистемах и его изменении под влиянием разных факторов, включая антропогенные, еще далеки от полноты. Об этом свидетельствует и обнаруженный нами аномально широкий диапазон индивидуальной изменчивости значений $\delta^{15}\text{N}$ у карповых рыб рода *Cyprinion* Heckel 1843, собранных синхронно в одной локации.

Цель настоящей работы – сообщить о феномене высокой изменчивости величины $\delta^{15}\text{N}$ у карповых рыб и рассмотреть возможные причины этого явления.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отлов рыб проводили в начале июля 2022 г. в р. Акчай (рис. 1), правом притоке р. Батман (бассейн р. Тигр) у г. Батман в провинции Диарбакыр (Турция, 37.8655° с.ш., 40.9890° в.д.) при помощи электролова SAMUS 1000. Река длиной ~30 км, мелководна в районе отлова рыб (~50 см), вода мутная, температура воды $+27.5^\circ\text{C}$. Почти вся площадь бассейна находится в зоне интенсивного растениеводства, вода из реки используется на ирригационные цели. В улове отмечены четыре вида рыб – *Garra rufa* (Heckel 1843) ($n = 1$), *Cyprinion macrostomus* Heckel 1843 ($n = 25$), *C. kais* Heckel 1843 ($n = 13$) и *Luciobarbus schejch* Heckel 1843 ($n = 4$). Рыб доставляли живыми в лабораторию. После эвтаназии с применением раствора гвоздичного масла рыб фотографировали

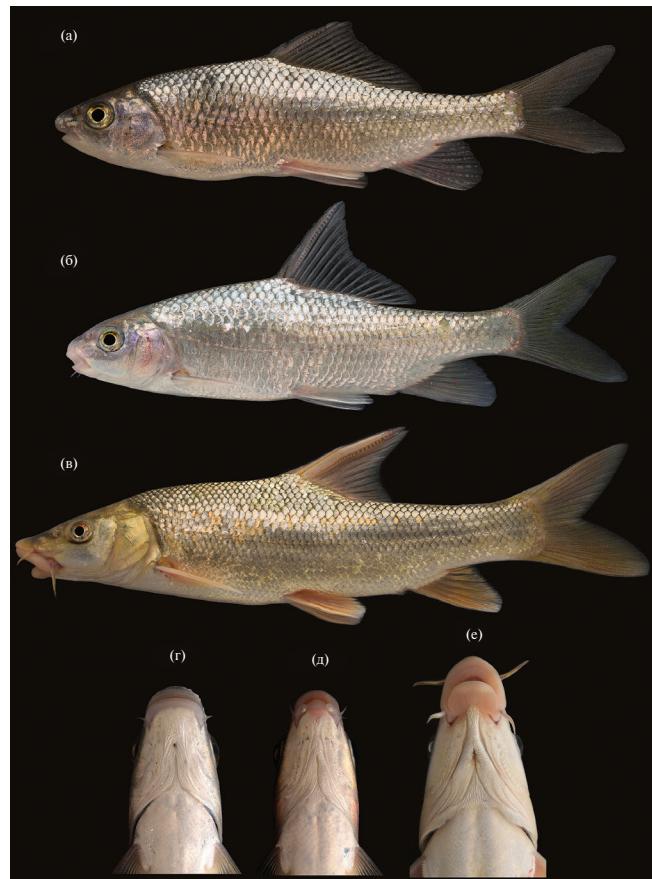


Рис. 2. Внешний вид карповых рыб из р. Акчай (бассейн р. Тигр) и их ротовых аппаратов (вид снизу): а, г – *Cyprinion macrostomus* ($SL = 125$ мм); б, д – *C. kais* ($SL = 114$ мм); в, е – *Luciobarbus schejch* ($SL = 168$ мм) соответственно.

с использованием фотокамеры Nikon D5300 (Nikon Corporation, Токио, Япония), измеряли стандартную длину SL (мм), определяли пол и степень развития гонад. С дорзальной стороны тела под спинным плавником извлекали ткани белых мышц и помещали в пробирки с этанолом при соотношении объема спирта к объему тканей 10 : 1. Предыдущие исследования показали, что различия изотопного состава высушенных (нефиксированных) и фиксированных в этаноле мышц несущественны, особенно в отношении $\delta^{15}\text{N}$ (Arrington, Winemiller, 2002; Britton et al., 2019; Durante et al., 2020). Для изотопного анализа пробы мышц высушивали при 60°C , затем гомогенизировали. Анализировали три вида рыб, различающиеся пищевыми стратегиями – соскребыватель-перифитонофаг *Cyprinion macrostomus*, соскребыватель-бентофаг *C. kais* и всеядный вид усачей *Luciobarbus schejch* (Coad, 2021) (рис. 2). Вид *Garra rufa* не использовали в анализе из-за недостаточности выборки. Гомогенизированные образцы взвешивали на аналитических весах Mettler Toledo MX5 с точностью до 2 мкг и упаковывали в оловянные капсулы. Масса проб тканей варьировала от 274 до 424 мкг. Изотопный анализ

проводили в Центре коллективного пользования Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (г. Москва) с помощью элементного анализатора Flash 1112 и изотопного масс-спектрометра Thermo Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific, США). Изотопный состав азота и углерода (величины $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$) выражали в тысячных долях (δ , ‰) отклонения от международного эталона (атмосферный азот и Vienna PeeDee Belemnite соответственно): $\delta X_{\text{образец}} (\%) = [(R_{\text{образец}}/R_{\text{эталон}}) - 1] \times 1000$, где X – элемент (азот или углерод), R – молярное соотношение тяжелого и легкого изотопов соответствующего элемента. Лабораторные стандарты были откалиброваны с помощью референтных материалов Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) USGS 40 и USGS 41 (глутаминовая кислота). Воспроизводимость измерений составила $\pm 0.2\%$. Совместно с определением изотопного состава во всех образцах определяли содержание азота и углерода (в %), а также соотношение C/N. Массовое соотношение C/N в тканях рыб не превышало 3.2. В связи с полученными неординарными результатами все аналитические процедуры (навеска, заворачивание и измерение изотопного состава) выполняли повторно для всех проб. Медианное значение разницы первого и второго измерений составили 0.06‰.

Статистический анализ и построение графиков проводили в среде R-studio v. 4.1.1 (RStudio Team, 2021). Базовая описательная статистика получена с помощью функции *summarytools* (Comtois, 2018). Для сравнения нескольких выборок по одному признаку применяли непараметрический тест Краскела–Уоллиса с post hoc тестом Данна (Dunn): функция *kWallPairsDunnTest* в библиотеке *PMCMRplus* (Pohlert, 2021). Библиотеку *ggplot2* (Wickham, 2016) использовали для вычисления корреляции Пирсона и построения графиков. Количественную оценку и сравнение изотопных трофических ниш по величинам $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ проводили путем расчета показателя SEAc (corrected standard ellipse area) – скорректированной площади стандартного эллипса с поправкой на малый размер выборок (Jackson et al., 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Стандартная длина рыб (*SL*) у *C. macrostomus*, *C. kais* и *L. schejch* была 64–134 мм (средняя – 105.4 ± 16.2 [SD]), 72–144 мм (средняя – 99.1 ± 19.3) и 157–193 мм (средняя – 174.0 ± 15.3) соответственно. Доля половозрелых особей *C. macrostomus* и *C. kais* составила 92.0 и 92.3%, соотношение полов – 7F:16M и 6F:6M соответственно; особи *L. schejch* были неполовозрелыми (2F:2M). Половозрелые особи обоих видов рода *Cyprinion* имели гонады разной стадии зрелости (II–IV). Величины $\delta^{15}\text{N}$ в мышечной

ткани рыб варьировали в крайне широких пределах: 1.7–15.8‰ (средняя 6.6 ± 4.1 [SD]‰) у *C. macrostomus*, 6.4–13.0‰ (средняя 9.7 ± 2.3 ‰) у *C. kais*, 7.1–11.5‰ (средняя 8.5 ± 2.0 ‰) у *L. schejch*. Абсолютные значения $\delta^{13}\text{C}$ варьировали также в широких пределах: от –28.0 до –20.4‰ (средняя – 24.0 ± 1.6 ‰) у *C. macrostomus*, от –29.5 до –21.5‰ (средняя – 25.1 ± 2.4 ‰) у *C. kais*, от –24.5 до –19.5‰ (средняя – 22.6 ± 2.2 ‰) у *L. schejch*. Стандартные эллипсы изотопных ниш существенно перекрывались для всех анализируемых видов (рис. 3). Достоверное различие обнаружено только между средними величинами $\delta^{15}\text{N}$ ($p = 0.047$) *C. macrostomus* и *C. kais* с более высоким содержанием ^{15}N у последнего. Корреляции между величинами $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$ и длиной не обнаружено ($p > 0.11$; рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разные водоемы могут значительно различаться по изотопному составу гидробионтов, что связано с целым рядом факторов: размером экосистемы (Finlay, 2001), условиями освещенности (Allan, Castillo, 2007), сезонными изменениями (Doi, 2009), характером донных отложений (Vadeboncoeur et al., 2006), соотношением автохтонного и аллохтонного поступлений (Doi, 2009), а также различиями в уровне антропогенного воздействия (Post, 2002; Power et al., 2013; De Carvalho et al., 2020). Однако наше исследование выявило аномально широкую внутривидовую вариацию изотопного состава мышечной ткани рыб, прежде всего величин $\delta^{15}\text{N}$, в пределах одной станции, чего ранее не отмечали.

Различие между трофическими уровнями по величине $\delta^{15}\text{N}$ в водных экосистемах составляет в среднем 2.3–3.0‰ (McCutchan et al., 2003; Vanderklift, Ponsard, 2003). Это подтверждается недавними исследованиями ряда симпатрических видов или экоморф карповых рыб, относящихся к разным филетическим линиям (например, Kanaya et al., 2009; Levin et al., 2019; Komarova et al., 2021). С другой стороны, показано (Nahon et al., 2020), что разные условия содержания (плотность посадки, режим кормления) карпа *Cyprinus carpio* L. и плотвы *Rutilus rutilus* (L.) в прудовых условиях за 9 мес. привели к существенному изменению величин $\delta^{15}\text{N}$ и $\delta^{13}\text{C}$, хотя различия между группами с разными условиями содержания не превышали 5.5‰.

Наиболее неожиданным результатом нашего исследования является высокая внутривидовая вариация величин $\delta^{15}\text{N}$, отмеченная у *Cyprinion macrostomus*. Рыбы одного размерного класса, пойманные в одно время и на одной станции, демонстрируют крайне широкий диапазон индивидуальных значений (1.7–15.8‰). Согласно

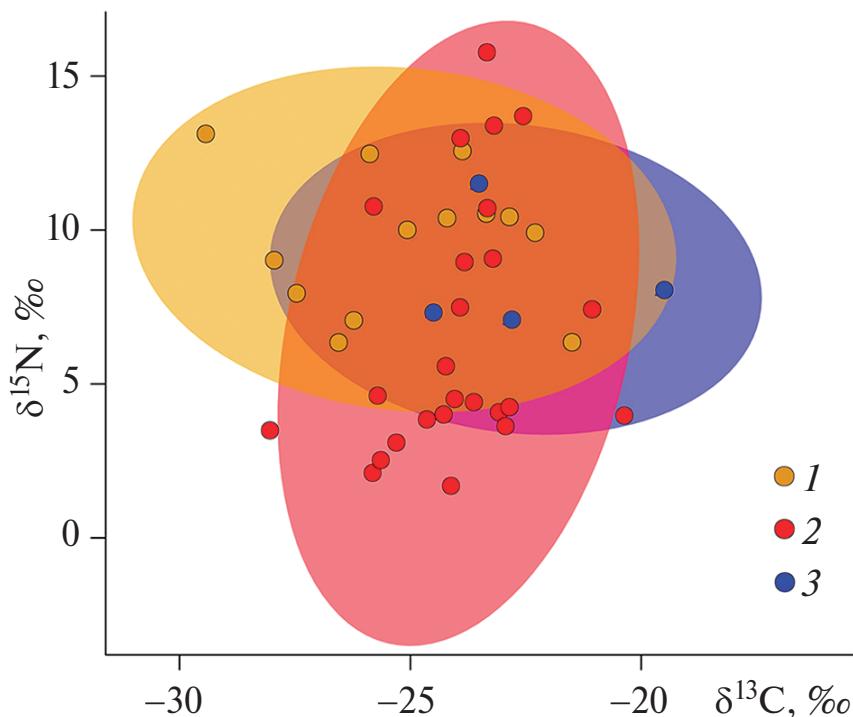


Рис. 3. Стандартные эллипсы изотопных ниш с 95%-ным доверительным интервалом. 1 – *Cyprinodon kais*, 2 – *C. macrostomus*, 3 – *Luciobarbus schejch*.

литературным данным, подобный диапазон характерен для целых многовидовых сообществ. Ниже мы выборочно приводим результаты опубликованных исследований с наибольшими пределами изменчивости величин $\delta^{15}\text{N}$ у рыб.

У 20 видов африканских рыб из 10 семейств (оз. Альберт, Уганда), относящихся к разным трофическим уровням, диапазон средних значений $\delta^{15}\text{N}$ составил от $3.7 \pm 0.0\text{\textperthousand}$ у детритофагов до $11.6 \pm 0.5\text{\textperthousand}$ у рыбоядов (Campbell et al., 2005). Сходные пределы межвидовой изменчивости величин $\delta^{15}\text{N}$ ($2.8\text{--}9.3\text{\textperthousand}$) обнаружены в выборке из 32 видов цихловых рыб из оз. Танганьика, относящихся к пяти трофическим гильдиям (альгофаги, бентофаги, зоопланктофаги, рыбояды и лепидофаги) (Wagner et al., 2009). В тканях белых мышц карповых рыб Северной Америки (изучено 50 видов разных трофических специализаций из разных водоемов двух штатов) средние величины $\delta^{15}\text{N}$ варьировали от 6.3 ± 0.3 до $18.3 \pm 0.0\text{\textperthousand}$ (Burress et al., 2016). В исследовании пресноводных рыб Центральной и Западной Индии (44 вида, относящиеся к 16 семействам с преобладанием видов из семейства карповых) пределы изменчивости $\delta^{15}\text{N}$ составили от 5.9 ± 0.0 до $17.2 \pm 0.0\text{\textperthousand}$ (Mondal, Bhat, 2021).

Помимо необычно широкой внутривидовой изменчивости, необходимо также отметить очень низкие величины $\delta^{15}\text{N}$ у нескольких особей *C. macrostomus*, достигающие минимума в $1.7\text{\textperthousand}$. Насколько нам известно, такую низкую величину

$\delta^{15}\text{N}$ у рыб ранее не регистрировали. В опубликованных работах минимальные величины $\delta^{15}\text{N}$ ($3.5\text{--}4.5\text{\textperthousand}$) обнаружены у альгофагов и детритофагов (например, Campbell et al., 2005; Wagner et al., 2009; Britton et al., 2019). По сравнению с другими совместно обитающими видами карповых, *C. macrostomus* – высокоспециализированный перифитонофаг (Coad, 2021). Недавние исследования показали, что перифитонофаги имеют высокий уровень $\delta^{15}\text{N}$ (Levin et al., 2021; Komarova et al., 2022), часто сопоставимый с таковым у рыбоядных видов рыб, поэтому высокие значения $\delta^{15}\text{N}$ у отдельных особей *C. macrostomus* не вызывают удивления. Предположительно, высокое содержание ^{15}N у перифитонофагов объясняется наличием специфической микрофлоры, необходимой для переваривания одноклеточных водорослей, богатых белком, и составляющих существенную часть перифитонных матов (Levin et al., 2021). В большей степени вызывает удивление расширение изменчивости в сторону наименьших значений – в том числе минимальных ($<3.0\text{\textperthousand}$). Такой размах изменчивости трудно объяснить сезонными, размерными, половыми или иными локальными различиями, включая возможное расхождение в пищевых специализациях.

Мы полагаем, что обнаруженный феномен аномально высокой изменчивости значений $\delta^{15}\text{N}$ может быть обусловлен сочетанием как минимум, двух факторов: (1) высоким уровнем антропогенного загрязнения реки формами подвижного

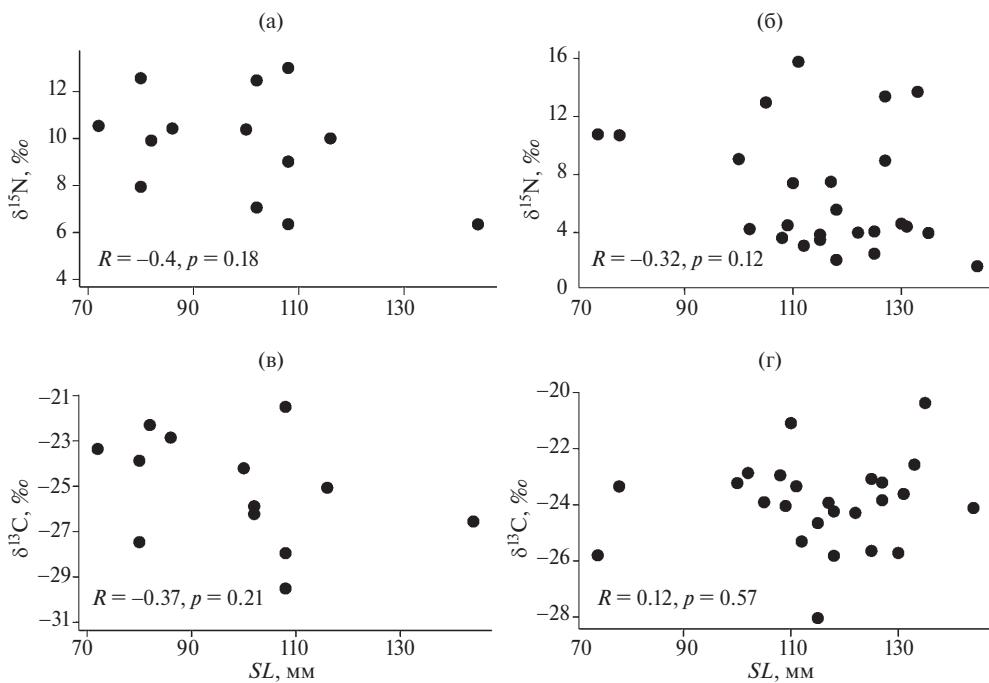


Рис. 4. Связь $\delta^{15}\text{N}$ (а, б) и $\delta^{13}\text{C}$ (в, г) с длиной тела у *Cyprinion kais* (а, в) и *C. macrostomus* (б, г).

азота, приводящими к снижению величин $\delta^{15}\text{N}$ в тканях гидробионтов и (2) попадания в выборку рыб-мигрантов с нормальным уровнем $\delta^{15}\text{N}$ из крупной р. Батман, притоком которой является р. Акчай. Водосбор р. Акчай полностью находится в зоне интенсивного растениеводства. Регион долины р. Тигр относится к орошающим земледельческим районам с активной химизацией земледелия (Al-Ansari et al., 2019). Широкое использование азотных удобрений приводит к попаданию в речные воды подвижных форм азота. В ряде публикаций (Lee et al., 2018; de Carvalho et al., 2020) было показано, что высокое содержание нитратов и аммония ассоциировано с аномально высокими и низкими величинами $\delta^{15}\text{N}$ в тканях гидробионтов, включая рыб. В частности, для аммонийного азота характерны низкие величины $\delta^{15}\text{N}$, высокие концентрации аммония в воде ассоциированы с низкими величинами $\delta^{15}\text{N}$ тканей гидробионтов, достигая минусовых значений в перифитоне и 5‰ в тканях сома-перифитонофага *Hypostomus* (de Carvalho et al., 2020).

Характерно, что в нашем исследовании необычно низкие индивидуальные значения $\delta^{15}\text{N}$ также были обнаружены у перифитонофага, то есть вида, специализирующегося на питании водорослевыми обрастаниями. Принимая во внимание вышеизложенное, и наряду со специфическим запахом аммиака от речной воды (Б.А. Левин, личное наблюдение), можно сделать предварительный вывод о значительном загрязнении исследованной реки формами подвижного азота.

В тканях мышц карповых рыб “изотопное равновесие” достигается в течение нескольких месяцев (Winter et al., 2019) и необычно низкие величины $\delta^{15}\text{N}$ не могли стать следствием кратковременных локальных аномалий. Наряду с континуальностью распределения величин $\delta^{15}\text{N}$ в выборке *C. macrostomus*, это предполагает наличие в нашей выборке особей, питавшихся на участках с разным уровнем содержания ^{15}N в перифитоне. По-видимому, широкий диапазон вариации величин $\delta^{15}\text{N}$ – следствие миграций рыб из крупной р. Батман в ее приток р. Акчай и разного по длительности пребывания рыб в этом загрязненном притоке. В пользу данного предположения свидетельствуют близость места сбора материала к устью р. Акчай (<2 км), широкий разброс величин $\delta^{13}\text{C}$, отражающий разнообразие условий произрастания перифитона, а также наличие у *C. macrostomus* длительного порционного нереста, который в условиях бассейна р. Тигр продолжается с мая по август (Faghani Langroudi, Mousavi Sabet, 2018). Конкретных сведений о миграциях *C. macrostomus* в литературе нет, однако локальные миграции в нерестовый период являются обычным явлением для карповых рыб.

Выявленная нами внутривидовая изменчивость величин $\delta^{15}\text{N}$ в какой-то степени близка к таковой в исследовании Бриттона с соавт. (Britton et al., 2019). Авторами этой работы обнаружены существенные различия величин $\delta^{15}\text{N}$ между выборками вида-перифитонофага цихловых *Tropheus brichardi* Nelissen & Thys van den Audenaerde, 1975, собранных с разных станций

оз. Танганьика, с различным уровнем антропогенного воздействия. Медианные величины $\delta^{15}\text{N}$ кратно различались между станциями, а общий диапазон внутривидовой изменчивости *T. brichardi* составил от 3.8 до 15.8‰ (реконструирован из графика в работе Britton et al., 2019). Это близко к значениям, полученным в нашем исследовании (1.7–15.8‰).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлена аномально высокая изменчивость изотопного состава азота в популяции *Cyprinion macrostomus*. Ранее подобную внутривидовую изменчивость у рыб обнаруживали для разных станций с различным уровнем антропогенного загрязнения, однако в нашем случае, аномально широкое распределение отмечено на одной станции. Причина обнаруженного феномена, по-видимому, связана с гетерогенностью выборки, состоящей из особей с разной временной экспозицией антропогенному загрязнению подвижными формами азота в связи с нерестовыми миграциями. Полученные нами предварительные данные показали, что при реконструкции трофических сетей в водных объектах с помощью изотопного анализа роль миграций рыб может недоучитываться. Безусловно, требуется дальнейшее изучение этого вопроса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарны О.Н. Артаеву (ИБВВ РАН) за фотографирование рыб, Р. Санда и Я. Вукич (Национальный музей Чешской Республики) за помощь в сборе материала, администрации Университета Битлес Эрен за предоставленную инфраструктуру для предварительной обработки материала в лабораторных условиях. Мы благодарны анонимным рецензентам за ценные замечания и советы при подготовке рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 19-14-00218 “Адаптивная радиация и видеообразование у карповых рыб в условиях симпатрии”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Al-Ansari N., Jawad S., Adamo N., Sissakian V.* 2019. Water quality and its environmental implications within Tigris and Euphrates rivers // *J. Earth Sci. and Geotech. Engin.* V. 9. P. 57.
- Allan J.D., Castillo M.M.* 2007. Detrital energy sources // *Stream ecology: Structure and function of running waters.* Dordrecht: Springer. P. 135.

Arrington D.A., Winemiller K.O. 2002. Preservation effects on stable isotope analysis of fish muscle // *Transactions of the American Fisheries Society.* V. 131. P. 337. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2002\)131<0337:PEOSIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2002)131<0337:PEOSIA>2.0.CO;2)

Boecklen W.J., Yarnes C.T., Cook B.A., James A.C. 2011. On the use of stable isotopes in trophic ecology // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics.* V. 42. P. 411. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144726>

Britton A.W., Murrell D.J., McGill R.A. et al. 2019. The effects of land use disturbance vary with trophic position in littoral cichlid fish communities from Lake Tanganyika // *Freshwater Biol.* V. 64. № 6. P. 1114. <https://doi.org/10.1111/fwb.13287>

Burress E.D., Holcomb J.M., Bonato K.O., Armbruster J.W. 2016. Body size is negatively correlated with trophic position among cyprinids // *Royal Soc. Open Sci.* V. 3. Art. 150652. <https://doi.org/10.1098/rsos.150652>

Campbell L.M., Wandera S.B., Thacker R.J. et al. 2005. Trophic niche segregation in the Nilotic ichthyofauna of Lake Albert (Uganda, Africa) // *Environ. Biol. Fish.* V. 74. P. 247. <https://doi.org/10.1007/s10641-005-3190-8>

Coad B.W. 2021. Carps and Minnows of Iran (Families Cyprinidae and Leuciscidae). V. I: General Introduction and Carps (Family Cyprinidae). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://briancoad.com/Species%20Accounts/Carps%20of%20Iran%2010Sept2opt1.pdf>. Дата обновления: 21.01.2024.

Comtois D. 2018. Summarytools: Tools to Quickly and Neatly Summarize Data. R Package Version 0.8. 7/2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://CRAN.R-project.org/package=summarytools>. Дата обновления: 20.05.2022.

De Carvalho D.R., Alves C.B.M., Flecker A.S. et al. 2020. Using $\delta^{15}\text{N}$ of periphyton and fish to evaluate spatial and seasonal variation of anthropogenic nitrogen inputs in a polluted Brazilian river basin // *Ecol. Indicators.* V. 115. Art. 106372. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106372>

Doi H. 2009. Spatial patterns of autochthonous and allochthonous resources in aquatic food webs // *Population Ecol.* V. 51. № 1. P. 57. <https://doi.org/10.1007/s10144-008-0127-z>

Durante L.M., Sabadel A.J., Frew R.D. et al. 2020. Effects of fixatives on stable isotopes of fish muscle tissue: implications for trophic studies on preserved specimens // *Ecol. Appl.* V. 30. № 4. Art. e02080. <https://doi.org/10.1002/eap.2080>

Faghani Langroudi H., Mousavi Sabet H. 2018. Reproductive biology of lotak, *Cyprinion macrostomum* Heckel, 1843 (Pisces: Cyprinidae), from the Tigris River drainage // *Iran. J. Fish Sci.* V. 17. P. 288.

Finlay J.C. 2001. Stable-carbon-isotope ratios of river biota: implications for energy flow in lotic food webs // *Ecology.* V. 82. Is. 4. P. 1052. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[1052:SCIRO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[1052:SCIRO]2.0.CO;2)

- Gladyshev M.I.* 2009. Stable Isotope Analyses in Aquatic Ecology (a review) // J. Siberian Federal Univ. Biol. V. 2. № 4. P. 381.
- Jackson A.L., Parnell A.C., Inger R., Bearhop S.* 2011. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER0—Stable Isotope Bayesian Ellipses in R // J. Anim. Ecol. V. 80. P. 595. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x>
- Komarova A.S., Golubtsov A.S., Levin B.A.* 2022. Trophic diversification out of ancestral specialization: An example from a radiating African cyprinid fish (genus *Garra*) // Diversity. V. 14. № 8. Art. 629. <https://doi.org/10.3390/d14080629>
- Komarova A.S., Rozanova O.L., Levin B.A.* 2021. Trophic resource partitioning by sympatric ecomorphs of *Schizopygopsis* (Cyprinidae) in a young Pamir Mountain Lake: preliminary results // Ichthyol. Res. V. 68. P. 191. <https://doi.org/10.3390/d14080629>
- Kanaya G., Yadrenkina E.N., Zuykova E.I. et al.* 2009. Contribution of organic matter sources to cyprinid fishes in the Chany Lake—Kargat River estuary, western Siberia // Marine and Freshwater Res. V. 60. P. 510.
- Lee K.Y., Graham L., Spooner D.E., Xenopoulos M.A.* 2018. Tracing anthropogenic inputs in stream food webs with stable carbon and nitrogen isotope systematics along an agricultural gradient // Plos One. V. 13. P. e0200312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200312>
- Levin B.A., Casal-López M., Simonov E. et al.* 2019. Adaptive radiation of barbs of the genus *Labeobarbus* (Cyprinidae) in an East African river // Freshwater Biol. V. 64. P. 1721. <https://doi.org/10.1111/fwb.13364>
- Levin B.A., Komarova A.S., Rozanova O.L., Golubtsov A.S.* 2021. Unexpected diversity of feeding modes among chisel-mouthed Ethiopian *Labeobarbus* (Cyprinidae) // Water. V. 13. № 17. Art. 2345. <https://doi.org/10.3390/w13172345>
- McCutchan Jr.J.H., Lewis Jr.W.M., Kendall C., McGrath C.C.* 2003. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur // Oikos. V. 102. Is. 2. P. 378. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2003.12098.x>
- Mondal R., Bhat A.* 2021. Investigating the trophic ecology of freshwater fish communities from central and eastern Indian streams using stable isotope analysis // Community Ecol. V. 22. P. 203.
- Nahon S., Roussel J.M., Jaeger C. et al.* 2020. Characterization of trophic niche partitioning between carp (*Cyprinus carpio*) and roach (*Rutilus rutilus*) in experimental polyculture ponds using carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotopes // Aquaculture. V. 522. Art. 735162. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735162>
- Newsome S.D., Martinez del Rio C., Bearhop S., Phillips D.L.* 2007. A niche for isotopic ecology // Frontiers in Ecology and the Environment. V. 5. Is. 8. P. 429. <https://doi.org/10.1890/060150.1>
- Pohlert T.* 2021. Package ‘PMCMRplus’. R Package Version 1.9.2.2021. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cran.r-project.org/web/packages/PMCMRplus/index.html>. Дата обновления: 10.12.2023.
- Post D.M.* 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions // Ecology. V. 83. Is. 3. P. 703. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[0703:USITET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[0703:USITET]2.0.CO;2)
- Potapov A.M., Tiunov A.V., Scheu S.* 2019. Uncovering trophic positions and food resources of soil animals using bulk natural stable isotope composition // Biol. Rev. V. 94. № 1. P. 37. <https://doi.org/10.1111/brv.12434>
- Power M.E., Holomuzki J.R., Lowe R.L.* 2013. Food webs in Mediterranean rivers // Hydrobiologia. V. 719. P. 119. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1510-0>
- RStudio Team.* 2021. RStudio: Integrated Development for R; RStudio, PBC: Boston, MA, USA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.rstudio.com>. Дата обновления: 01.02.2024.
- Vadeboncoeur Y., Kalf J., Christoffersen K., Jeppesen E.* 2006. Substratum as a driver of variation in periphyton chlorophyll and productivity in lakes // J. North Amer. Benthol. Soc. V. 25. № 2. P. 379. [https://doi.org/10.1899/0887-3593\(2006\)25\[379:SAA DOV\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1899/0887-3593(2006)25[379:SAA DOV]2.0.CO;2)
- Vanderklift M.A., Ponsard S.* 2003. Sources of variation in consumer-diet $\delta^{15}\text{N}$ enrichment: a meta-analysis // Oecologia. V. 136. № 2. P. 169. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1270-z>
- Winter E.R., Nolan E.T., Busst G.M., Britton J.R.* 2019. Estimating stable isotope turnover rates of epidermal mucus and dorsal muscle for an omnivorous fish using a diet-switch experiment // Hydrobiologia. V. 828. № 1. P. 245. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3816-4>
- Wickham H.* 2016. Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Wagner C.E., McIntyre P.B., Buels K.S. et al.* 2009. Diet predicts intestine length in Lake Tanganyika’s cichlid fishes // Functional Ecol. V. 23. Is. 6. P. 1122. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2009.01589.x>

Large Intraspecies Variation in Stable Isotope Composition of the Muscle Tissues in Fish of the Genus *Cyprinion* (cyprinidae) from Middle East

B. A. Levin^{1, 2, *}, Cüneyt Kaya³, A. S. Komarova^{1, 2}, M. A. Levina^{1, 4},
O. L. Rozanova², A. V. Tiunov²

¹Papanin Institute for Biology of Inland Waters of Russian Academy of Sciences,

Borok, Nekouzskii raion, Yaroslavl oblast, Russia

²Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the Russian Academy of Sciences, Moscow Russia

³Recep Tayyip Erdogan University, Rize, Turkey

⁴Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

*e-mail: borislyovin@gmail.com

Significant individual variation of nitrogen and carbon isotope composition ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values) in white muscle tissues was found in samples of three cyprinid fish species, *Cyprinion macrostomus* (periphytonophage), *Cyprinion kais* (benthophage), and *Luciobarbus schejch* (omnivore), collected in a small tributary of the upper Tigris system (Turkey). In particular, exceptionally low value (1.7‰) and abnormally wide intraspecific variability (from 1.7 to 15.8‰) of $\delta^{15}\text{N}$ were observed in *C. macrostomus*. Despite samples were collected synchronously and syntopically, very broad range of $\delta^{15}\text{N}$ values points out possible heterogeneity of the samples. The studied watercourse is located in the zone of agriculture with intensive chemicalization and pollution of the river by mobile forms of nitrogen (mostly ammonium) could play a significant role in lowering $\delta^{15}\text{N}$ values, especially in the periphytonophage. Along with that, fish with high (normal) $\delta^{15}\text{N}$ values are supposedly recent migrants that came from a large river for joint spawning with resident fish. The pollution of water bodies as well as the presence of migrations should be taking into account in stable isotope analyses-based studies on trophic ecology of fishes.

Keywords: stable isotopes of nitrogen and carbon, trophic relationships, anthropogenic pollution, lotic ecosystems