

Промысловые виды
и их биология

УДК 597.553.2 (282.257.21)

Содержание макро- и микроэлементов в тканях
нерки из водоёмов полуострова КамчаткаА.М. Хрусталева¹, Т.Ю. Углова², А.А. Ксенофонтова³, Д.А. Ксенофонтов³, Н.В. Кловач²¹ Институт биологии гена Российской академии наук (ФГБУН «ИБГ РАН»), г. Москва² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «ВНИРО»), г. Москва³ Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева (ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»), г. Москва

E-mail: tasha-ug@yandex.ru

Представлены результаты исследования содержания макро- (Ca, Mg) и микро- (Mn, Zn, Cu, Fe) элементов в тканях грудных плавников производителей нерки *Oncorhynchus nerka* из рек Большая, Камчатка и оз. Азабачье (полуостров Камчатка). Найдены достоверные различия в содержании минеральных веществ в тканях рыб из трёх обследованных водных объектов. Установлено, что наибольшая доля золы (и массовая доля микроэлементов) в сухом веществе содержится в тканях нерки р. Камчатка, наименьшая — в выборке из оз. Азабачье. Содержание Ca составило 98% от массы золы во всех образцах, на долю Mg пришлось чуть менее 2%. Доля остальных элементов колебалась в пределах 0,1%, и именно в этом диапазоне были выявлены различия микроэлементного состава между выборками. В тканях нерки из р. Камчатка содержание тяжёлых металлов, а также Ca и Mg было выше, чем в других выборках, а их процентное соотношение существенно отличалось. Очевидно, исследованные водоёмы различаются по гидрохимическим показателям, что оказало влияние на интенсивность биоаккумуляции микроэлементов в тканях рыб на этапе пресноводного нагула.

Ключевые слова: нерка *Oncorhynchus nerka*, Камчатка, макро- и микроэлементы, содержание минеральных веществ.

DOI: 10.36038/2307-3497-2020-179-26-36

ВВЕДЕНИЕ

Камчатский полуостров — это один из богатейших природными ресурсами регионов Дальнего Востока России. Регион изобилует термальными и минеральными источниками, вулканами и ледниками, озёрами и крупными реками, создающими в своём

роде уникальные и разнообразные условия для жизни и воспроизводства различных гидробионтов. На территории Камчатки насчитывается несколько десятков тысяч больших и малых озёр и множество рек, в бассейнах которых воспроизводятся тихоокеанские лососи. Реки Камчатка и Большая

являются главными водными артериями полуострова, где размножаются многочисленные популяции нерки [Бугаев и др., 2002].

Проходная нерка относится к тихоокеанским лососям с длительным пресноводным и морским периодами жизни. Обычно пресноводный этап составляет 1–3 года, после чего молодь скатывается в океан, где в большинстве случаев проводит от 2 до 3 лет и возвращается в водоём воспроизводства на нерест [Смирнов, 1975; Burgner, 1991; Миловская, 2006; Бугаев, 2015]. В пресноводный период жизни молодь нерки питается, главным образом, планктонными организмами, при этом обилие планктона и биологическая продуктивность водоёмов в значительной степени обусловлены наличием в воде минеральных соединений [Лукьянова, 2007].

Реки и озера Камчатки различаются по гидрохимическим показателям, что оказывает непосредственное влияние на обитающих в них гидробионтов [Введенская и др., 2006; Лукьянова, 2007]. Химический состав воды, особенности питания и продолжительность жизни в водоёме неизбежно отражаются на аккумулированном количестве минеральных веществ в организме рыб. Минеральные элементы входят в состав опорных и покровных тканей рыб — скелета, чешуи, кожи, а также биологически активных соединений. Минеральные вещества играют важную роль в регуляции осмотического давления в клетке, возбудимости клеток, кислотно-щелочного равновесия; в составе различных соединений участвуют в процессах пищеварения и всасывания, выделения и нейтрализации токсинов [Сорвачев, 1982]. По количественному содержанию в тканях они делятся на макро- (Ca, Mg, K, Na и др.; >100 мг/кг) и микро- (Fe, Cu, Mn, Zn, Co и др.; 0,01–90 мг/кг) элементы [Иванов, 2003]. В среднем общая сумма минеральных элементов в теле рыб составляет 2,5–8,0%, причём на долю макроэлементов приходится более 99,5% [Щербина, Гамыгин, 2006]. Особенность минерального питания рыб состоит в том, что макро- и микроэлементы поступают в организм не только с пищей, но и непосредственно из воды через жабры, слизистые покровы ротовой полости и кожу

[Скляр, 2008]. Поддержание их содержания в тканях на физиологическом уровне необходимо для обеспечения постоянства внутренней среды (гомеостаза) организма и протекания ряда биохимических реакций. Однако, содержащиеся в воде в избыточных концентрациях некоторые микроэлементы, в частности тяжёлые металлы, депонируются в костной ткани и, таким образом, фиксируются в организме на годы.

Нерке свойственен выраженный «хоминг», т. е. инстинкт возврата рыб на нерест в родные водоёмы [Бугаев, 1995; Черешнев и др., 2002], благодаря которому воспроизводство каждого стада происходит в специфических для данного водоёма условиях, в том числе в силу различий гидрологии и гидрохимии рек. Особенности микроэлементного состава воды запечатлеваются молодь во время пократной миграции (импринтинг), что позволяет взрослым особям ориентироваться и находить свой родной водоём при миграции к нерестилищам [Яроцкий, 2013]. Различные типы речного питания (ледниковое, дождевое и грунтовое), гидрологические и физико-химические условия, а также геологические, географические и климатические факторы как в отдельности, так и в совокупности определяют особенности элементного состава воды в водоёмах воспроизводства нерки.

Можно предположить, что микроэлементный состав тканей нерки из разных водоёмов будет различаться. В этом случае депонированные в тканях молоди элементы могут служить маркерами происхождения производителей. В связи с этим целью данной работы стало выявление различий в химическом составе тканей плавников нерки, пойманной в разных водоёмах Камчатки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для настоящих исследований послужили образцы ткани грудного плавника производителей нерки, собранные в 2004 г. в разных водоёмах Камчатского полуострова: в нижнем течении рек Большая и Камчатка, а также в оз. Азабачье (рис. 1).

В реке Большая лов производился на расстоянии 5–6 км от устья реки в течение пер-

вой половины массового нерестового хода нерки позднего срока хода (летняя нерка). В бассейне реки Камчатка лов осуществляли на расстоянии 4 и 30 км от устья в период первой половины нерестового хода летней нерки. Производители весенней нерки бассейна р. Камчатка, мигрирующие на нерестилище в р. Бушуева, были отловлены в оз. Азабачье 3 и 13 июля 2004 г. (табл. 1). Рыбы, выловленные в реках, были преимущественно на III стадии зрелости («серебрянки»), в озере — на IV, с заметными нерестовыми изменениями. После отлова у 20 особей с каждой точки отбирали образцы основания грудного плавника для последующего проведения анализа минерального состава. Образцы консервировались в этаноле (96%-ный ректификат высшей очистки) с использованием реактива одной и той же партии завода-изготовителя.

Основу лопасти грудного плавника производителей нерки образуют костная и эпителиальная ткани в соотношении 1:3, последней свойственна высокая скорость обновления/регенерации, соответственно, металлы в ней не должны накапливаться. Костная же ткань относится к высокоспециализированным физиогенным биоминералам и является основным местом депонирования ряда макро- (более 80% Ca

и 50% Mg в организме рыб сосредоточены в костном матриксе) и микро- (таких как Zn, Mn) элементов в организме рыб [Шербина, Гамыгин, 2006].

Определение минерального состава тканей плавников осуществлялось в лаборатории кафедры физиологии, этологии и биохимии животных РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева в 2012 г. Каждый образец высушивали при температуре 105 °С до постоянной массы. Биоматериал озоляли в муфельной печи при температуре 400–500 °С, и рассчитывали долю золы (%) в сухом веществе. При сжигании биоматериала органические элементы улетучиваются в виде газообразных соединений и паров воды, а в золе остаются окислы «зольных» элементов, на долю которых приходится в среднем около 5% изначальной массы вещества. В образцах определяли содержание четырёх тяжёлых металлов (Mn, Fe, Cu, Zn) и двух щелочноземельных металлов, основных компонентом костного матрикса (Ca и Mg). Для этого брали навеску золы массой 50 мг и растворяли в 2 мл 12%-ной соляной кислоты (ГОСТ 3118–77). Раствор доводили до объёма 10 мл, а затем методом масс-спектрометрии в атомно-абсорбционном спектрометре (модель «Спектр-5–4») определяли концентрации минеральных элементов



Рис. 1. Карта-схема района работ с указанием мест сбора материала

(относительная погрешность при измерении оптической плотности на длине волны 324,8 Нм во всем диапазоне измеряемых концентраций не более 5%) и рассчитывали содержание их в сыром и сухом веществе, а также в золе. Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с помощью MS Excel и библиотек data.table и gplots пакета R: тесты на нормальность осуществляли с использованием *w*-критерия Шапиро-Уилкса, тесты на равенство средних трёх выборок — с использованием *h*-критерия Краскела-Уоллиса, парные тесты на равенство средних — *u*-критерия Манна-Уитни, для коррекции на множественные сравнения использовали поправку Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Данные по массовому содержанию макро- и микроэлементов, а также процентному содержанию золы в сыром веществе

тканей нерки из трёх обследованных нами водоёмов приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Распределения величин масс анализируемых металлов в навеске золы в большинстве случаев удовлетворительно описывались нормальным распределением (за рядом исключений: массовые доли Mg ($p = 0,01$), Zn ($p = 0,004$) и Mn ($p = 0,004$) в выборке КК; Cu ($p = 0,006$) и Fe ($p = 0,01$) в выборке КВ; Fe ($p = 0,002$) в выборке ККа).

Существенных различий в содержании золы в тканях рыб, воспроизводящихся в бассейнах двух крупных озёрно-речных систем Западной и Восточной Камчатки (реки Большая и Камчатка) не отмечено (рис. 2). Наибольшая доля золы в сухом веществе выявлена в плавниках нерки из среднего и верхнего течения реки Камчатка, а в выборке из реки Большая и озера Азабачье (нижнее течение реки Камчатка) этот показатель был ниже на 2,5 и 7,4%, соответственно (табл. 1).

Таблица 1. Содержание золы и минеральный состав тканей нерки, выловленной в разных водоёмах полуострова Камчатка

Водоём (обозначение выборки)	<i>n</i> , экз.	Содержание золы в сыром веществе, % ($M \pm m$)	Масса макро (г) и микроэлементов (мг) в навеске золы массой в 100 г ($M \pm m$)					
			Ca, г/%	Mg, г/%	Zn, мг/%	Fe, мг/%	Mn, мг/%	Cu, мг/%
Река Камчатка (КК)	20	32,28±4,614	8,41±1,134	0,19±0,024	36,81±3,503	18,35±1,648	0,86±0,089	0,17±0,019
Озеро Азабачье (ККа)	20	24,87±1,978	4,21±0,573	0,07±1,388	4,17±0,818	2,72±0,707	0,12±0,405	0,06±0,189
Река Большая (КВ)	20	29,74±1,055	4,67±0,225	0,11±0,007	5,81±0,411	4,53±0,581	0,20±0,012	0,09±0,015

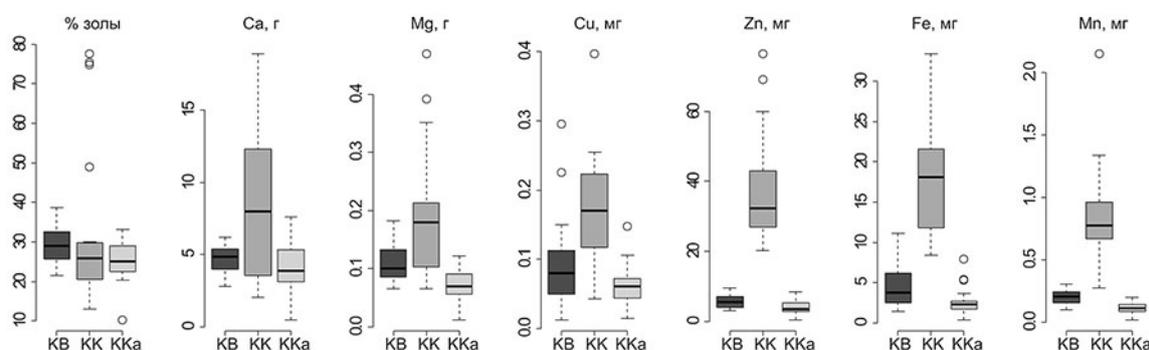


Рис. 2. Диаграммы размаха содержания золы (%) и минеральных элементов (г, мг) в 100 г золы, отображающие основные характеристики распределений величин: медиану (жирная горизонтальная черта), 1 и 3 квантили (границы ящика), края статистически значимой выборки без выбросов (концы усов) и выбросы (кружки); обозначения выборок как в табл. 1.

Содержание минеральных элементов в 100 г золы, полученной при сжигании образцов плавников нерки из разных водоёмов Камчатки, значимо различалось (Краскел-Уоллис-тесты $p \ll 0,001$). Наиболее высокие оценки массы макро- (Ca, Mg) и микроэлементов (Mn, Zn, Cu, Fe) отмечены в выборке из р. Камчатка, наиболее низкие — в оз. Азабачье (рис. 2). Оценки содержания минеральных веществ в тканях нерки из р. Большая лишь незначительно превосходили соответствующие оценки для выборки из оз. Азабачье.

При попарном сравнении выборок из разных водоёмов полуострова Камчатка по макро- и микроэлементному составу тканей были выявлены высоко достоверные различия между ними в большинстве тестов после введения поправки на множественные сравнения (табл. 2). Исключение составили выборки из оз. Азабачье и р. Большая, и две выборки из бассейна р. Камчатка, различия

в массовом содержании Ca в навеске золы в которых были не значимы.

В плавниках нерки из всех обследованных водоёмов доля Ca в образцах тканей плавников нерки составляет большую часть — около 98%, а на долю Mg приходится чуть менее 2%. Доля же остальных минеральных веществ суммарно составляет менее 0,1%. При этом именно в пределах этой величины и проявляются особенности микроэлементного состава тканей нерки из разных водоёмов воспроизводства. При сравнении процентного содержания Fe, Mn, Zn, Cu было установлено, что Zn преобладал во всех сравниваемых группах, однако в выборке р. Камчатка этот показатель был несколько выше, чем в других выборках, а содержание Cu оказалось самым низким по сравнению с другими выборками (рис. 3). Массовые доли Fe и Mn были наибольшими в выборке р. Большая. Аналогичные показатели для выборки из оз. Азабачье имели промежуточные значения.

Таблица 2. Матрицы уровней значимости (p) по результатам сравнения выборок с использованием i -критерия Манна-Уитни по оценкам содержания макро- (Ca, Mg) и микро- (Zn, Fe, Mn, Cu) элементов в тканях нерки из разных водоёмов Камчатки; обозначения выборок как в табл. 1

Элемент	Выборка	КВ	КК	ККа
Ca, г	ККа	0,301	0,013	—
	КК	0,049	—	0
Mg, г	КВ	—	0,004	0
	ККа	0,008	0	—
Zn, мг	КК	0	—	0
	КВ	—	0	0,006
Fe, мг	ККа	0	0	—
	КК	0	—	0
Mn, мг	КВ	—	0,004	0
	ККа	0,301	0,013	—
Cu, мг	КК	0,049	—	0
	КВ	—	0,004	0

ОБСУЖДЕНИЕ

Наши исследования выявили различия в содержании макро- и микроэлементов в тканях нерки из трёх обследованных водоёмов Камчатки: содержание металлов в тканях нерки из р. Камчатка было существенно выше, чем в двух других водоёмах. Наиболее вероятно, это связано с различным уровнем минерализации воды в районах нагула молоди на раннем пресноводном этапе жизненного цикла. К такому же выводу пришли и другие исследователи [Иванов, 2003].

На минеральный состав тканей гидробионтов оказывают влияние гидрохимические показатели воды, такие как: жёсткость, мине-



Рис. 3. Процентное соотношение содержания микроэлементов в тканях нерки из разных водоёмов Камчатки

рализация, содержание в воде кислорода. Не менее важен температурный режим водоёма, что связано с ускорением метаболизма у пойкилотермных животных при повышении температуры воды. Элементы, концентрация которых в воде обычно невелика, поступают в организм преимущественно с пищей [Пырников, 2017; Шеханова, 1961]. Наиболее важными среди них являются биогенные вещества — азот, фосфор, кремний, железо. Кроме того, продолжительность жизни особей в определённых условиях также является решающим фактором.

Так как нерка проводит в пресноводных выростных водоёмах почти половину жизни, можно ожидать, что в её организме (главным образом в костной ткани) депонируются минеральные элементы, преимущественно присутствующие в воде данной реки. Несмотря на то, что в океане рыбы проводят в среднем 3 года, районы морского нагула камчатских стад существенно перекрываются, т. е. морской период их жизни проходит в более или менее сходных условиях и не должен кардинальным образом сказываться на различиях в специфике минерального состава. С другой стороны, в практически изолированных вследствие высокого хоминга популяциях нерки могут накапливаться генетические изменения, связанные в том числе и с эффективностью обмена в организме рыбы. Все эти обстоятельства создают основу для дифференциации стад нерки по минеральному составу тканей как маркеру популяционной принадлежности.

Водоёмы для анализа выбраны не случайно: это две крупные нерковые реки Камчатки, протекающие по территории с разнообразным рельефом (в т. ч. вулканическим) и различающиеся степенью минерализации вод. Среднее течение реки Камчатка расположено в непосредственной близости от вулканов Ключевской группы, периоды активности которых, сопровождающиеся пеплопадами, обуславливают повышение минерализации воды на данном участке бассейна [Лепская, 2000; Куренков, 2005; Лукьянова, 2007; Бугаев, Кирпичников, 2008]. Кроме того, высокая минерализация воды в основном русле реки Камчатка наблюдается ниже поселков Козы-

ревский и Ключи, после впадения рек Толбачик и Студёная, бассейны которых расположены в зоне активного вулканизма [Ресурсы внутренних вод ..., 1973]. По химическому составу вода в реке Камчатка в течение всего года относится к гидрокарбонатному классу (общая жёсткость изменяется от 0,52 до 1,80 мг-экв/л, величина рН 6,35–7,50). Минерализация воды колеблется значительных в пределах 35–200 мг/л (в период половодья — 35–110 мг/л, в период межени — до 200 мг/л) [Ресурсы внутренних вод ..., 1973]. В верховьях притоков реки находятся геотермальные источники (в долине реки Киревны, в районе Эссо — Анавгай и в бассейне реки Козыревка). Все это вместе определяет уникальный микроэлементный состав воды данного речного бассейна.

Озеро Азабачье расположено в нижнем течении реки Камчатка. Гидрохимический режим вод озера определяется в основном притоком речных и грунтовых вод, состав которых формируется путём выветривания, вымывания и дренирования изверженных пород, слагающих бассейн водоёма [Базаркина, 2002]. Исходя из количества и соотношения ионов в водах озера (суммарная концентрация ионов — 85,0 мг/л) озеро Азабачье относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу с пресной мягкой маломинерализованной водой [Алекин, 1975].

По химическому составу воды река Большая относится к гидрокарбонатному классу, категории очень мягких вод (жёсткость воды не превышает 0,6 мг/л). Минерализация воды не высока и составляет 20–30 мг/л [Ресурсы внутренних вод ..., 1973]. Поступление биогенных элементов происходит с поверхностным и грунтовым стоком, с телами отнерестившихся лососей, наземной растительностью, а также от внутриводоёмных процессов [Введенская и др., 2006]. В верховьях реки Большая также расположены геотермальные источники — Малкинские и Начикинские, высокая степень минерализация воды в которых, их химический и газовый состав также могут оказывать влияние на минеральный состав воды в русле.

Таким образом, различия минерального состава воды обследованных водоёмов опре-

деляются главным образом особенностями их подземного питания. Было показано, что минеральные воды геотермальных источников оказывают локальное влияние на формирование гидрохимического состава рек и их притоков [Яроцкий, 2013]. Выявленная нами относительно высокая концентрация Fe, Zn, Mn в плавниках рыб из р. Камчатка может быть обусловлена насыщенностью воды в русле этими элементами, которые поступают в реку благодаря многочисленным выходам термальных вод, расположенным в притоках среднего и верхнего течения. К бассейнам этих притоков приурочены места нереста и нагула молоди нерки наиболее многочисленных популяций в данной озерно-речной системе [Бугаев, 1995].

В плавниках нерки из озера Азабачье, напротив, содержание микроэлементов ниже, чем у рыб, пойманных в реках Камчатка и Большая. При этом озеро соседствует с Ключевскими вулканами, для которых характерна активная вулканическая деятельность и выбросы пепла и, как следствие, минерализация воды окружающих водоёмов, а также изменения её химического состава. Так, извержение вулканов вблизи оз. Азабачье приводит к повышению содержания в его воде биогенных элементов, которые имеют большое значение для развития и роста гидробионтов. Многолетними исследованиями установлено, что бурное цветение водорослей и увеличение вторичной продукции в озере происходили после выпадения на водосбор водоёма пепла действующих вулканов Ключевской группы. Одним из следствий пеплопадов были мощные возвраты производителей нерки на озёрные нерестилища. Роль биогенных добавок, как пускового механизма биологических процессов в нерковых водоёмах, была теоретически обоснована ещё Е.М. Крохиным [1967] и впоследствии экспериментально доказана [Куренковым, 1999]. Однако, выявленные нами низкие уровни содержания минералов в тканях нерки, по всей видимости, связаны с низкой вулканической активностью Ключевских вулканов в период, предшествующий сбору материала. В середине 1990-х гг. и в начале 2000-х вулканы были не активны. После затяжного молчания их активность по-

степенно нарастала с 2001 по 2003 гг., а первые сильные извержения, сопровождающиеся пеплопадами, наблюдались в 2004 и 2005 гг. [Маневич, 2006]. Таким образом, пойманная в 2004 г. нерка озера Азабачье, 1999–2001 гг. рождения, нагуливалась и росла в условиях слабоминерализованного олиготрофного озера. Так, исследователями-лимнологами в конце 90-х гг. показано, что в экосистеме оз. Азабачье отмечены критически низкие показатели биологической продуктивности на всех трофических уровнях, а по величине биомассы планктонных ракообразных озеро стало соответствовать олиготрофному типу [Базаркина, 2002].

Результаты, полученные при обработке образцов ткани нерки р. Большая, демонстрируют существенные отличия по содержанию цинка, железа и марганца от такового в плавниках нерки бассейна р. Камчатка (устье р. Камчатка и оз. Азабачье). И хотя большую часть составляет, как и в других образцах, кальций и магний, являющиеся основными минеральными элементами костей и плавников, содержание всех рассмотренных нами элементов у нерки из р. Большая оказались немногим выше, чем в образцах из оз. Азабачье, но ниже чем в образцах нерки из бассейна р. Камчатка. Это, очевидно, объясняется относительно низкой степенью минерализации воды в данном речном бассейне: суммарное содержание ионов в водах её основных притоков, рек Плотникова и Быстрая, где в основном сосредоточены нерестилища нерки, колеблется в пределах 31–70 мг/л [Ресурсы внутренних вод ..., 1973] и вполне сопоставимо со степенью минерализации оз. Азабачье. В последние годы бассейн р. Большая также не был подвержен значительному антропогенному загрязнению в связи с отсутствием хозяйственных стоков [Введенская и др., 2006].

ВЫВОДЫ

1. Содержание макроэлементов в образцах плавников нерки, пойманной в разных водоёмах Камчатки, относительно стабильно и составляет 98% для кальция и 2% для магния.

2. Из микроэлементов большая часть приходится на цинк (54,6–65,5%) и железо (32,7–

42,6%), доля марганца (1,5–1,9%) и меди (0,3–0,9%) не высока.

3. Вероятно, на минеральный состав тканей влияет минеральный состав воды выростных водоёмов, где проходит нагул молоди.

4. Наиболее высокие показатели массового содержания минеральных веществ (макро- и микроэлементов) обнаружены в образцах ткани нерки из русла р. Камчатка, наиболее низкие — из оз. Азабачье.

5. Высокое содержание минеральных веществ, в т. ч. микроэлементов в тканях нерки из р. Камчатка обусловлено относительно высокой минерализацией воды вследствие активного вулканизма и выходов геотермальных вод в её среднем течении, что способствует интенсивному накоплению макро- и микроэлементов в костной ткани местной молоди тихоокеанских лососей.

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О.А. 1975. Химия озёр // Гидрология озёр и водохранилищ М.: МГУ. ч. I. С. 32–46.
- Базаркина Л.А. 2002. К проблеме повышения кормовых ресурсов молоди нерки в озере Азабачье // Исследование водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. Вып. 6. С. 251–259.
- Бугаев А.В. 2015. Преднерестовые миграции тихоокеанских лососей в экономической зоне России. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатНИРО. 413 с.
- Бугаев В.Ф. 1995. Азиатская нерка (пресноводный период жизни, структура локальных стад, динамика численности). М.: Колос. 463 с.
- Бугаев В.Ф., Кириченко В.Е. 2008. Нагульно-нерестовые озера азиатской нерки (включая некоторые другие водоёмы ареала). Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс. 280 с.
- Бугаев В.Ф., Остроумов А.Г., Непомнящий К.Ю., Маслов А.В. 2002. Некоторые особенности биологии нерки *Oncorhynchus nerka* р. Большой (Западная Камчатка) и факторы, влияющие на её биологические показатели // Известия ТНИРЦ. Т. 130. С. 758–776.
- Введенская Т.Л., Уколова Т.К., Свириденко В.Д. 2006. Гидрохимическая характеристика реки Большая (Камчатка) // Исследование биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. Вып. 6. С. 158–165.
- Иванов А.А. 2003. Физиология рыб. М.: Мир. 284 с.
- Крохин Е.М. 1967. Материалы к познанию карликовой красной в оз. Дальнее (Камчатка) // Вопросы ихтиологии. Вып. 3. С. 433–445.
- Куренков И.И. 1999. Результаты интродукции кокани в озера Камчатки // Проблемы охраны и рационального использования биоресурсов Камчатки: Доклады областной научно-практической конференции. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор. С. 30–38.
- Куренков И.И. 2005. Зоопланктон озёр Камчатки. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 178 с.
- Лепская Е.В. 2000. Фитопланктон оз. Азабачье и его роль в питании массовых видов зоопланктона // Исследование биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. Камчатский печатный двор. Вып. V. С. 152–160.
- Лукьянова О.Н. 2007. Гидрохимическая основа биопродуктивности нерестово-выростных лососевых озёр // Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. 22 с.
- Маневич А.Г., Гирина О.А., Малик Н.А., Мельников Д.В., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В., Котенко Л.В. 2006. Активность вулканов Камчатки и Северных Курил в 2005 г. // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Мат. первого межд. симп. Петропавловск-Камчатский. С. 76–86.
- Миловская Л.В. 2006. Влияние условий нагула молоди нерки в озере Курильское на структуре чешуи, размеры покатников и выживаемость поколений // Исследование водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-Западной части Тихого океана. Вып. 8. С. 166–187.
- Пырских А.С. 2017. Рост и рыбоводно-физиологические показатели теляпии при выращивании на комбикормах с добавкой «метаболит плюс». Автореф. дис. ... канд. с. х. наук. 20 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. 1973. Л.: Гидрометеиздат. Камчатка. Т. 20. 367 с.
- Скляр В.Я. 2008. Корма и кормление рыб в аквакультуре. М.: Изд-во ВНИРО. 150 с.
- Смирнов А.И. 1975. Биология, размножение и развитие тихоокеанских лососей. М.: МГУ. 335 с.
- Сорвачев К.Ф. 1982. Основы биохимии питания рыб. М.: Лёгкая и пищевая промышленность. 247 с.
- Черешнев И.А., Волобуев В.В., Шестакив А.В., Фролов С.В. 2002. Лососевидные рыбы Северо-Востока России. Владивосток: Дальнаука. 496 с.
- Шеханова И.А. 1961. Некоторые вопросы фосфорного обмена у рыб // Труды ВНИРО. Т. 46. С. 60–77.
- Щербина М.А., Гамыгин Е.А. 2006. Кормление рыб в пресноводной аквакультуре. М.: Изд-во ВНИРО. 360 с.
- Яроцкий Г.П. 2013. Дикая тихоокеанская лосось Северо-Запада Пацифики. Феномен и путь спасения. Камчатка и Корякия. Saarbrücken, Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing. 273 с.
- Burgner R.L. 1991 Life history of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) // Pacific Salmon Life Histories. / C. Groot and L. Margolis ed. UBC Press. Canada. P. 3–117.

Поступила в редакцию 06.11.2019 г.
Принята после рецензии 02.03.2020 г.

Commercial species
and their biologyTrace element content in tissues of sockeye salmon from
several waterbodies of the Kamchatka PeninsulaA. M. Khrustaleva¹, T. Yu. Uglova², A. A. Ksenofontova³, D. A. Ksenofontov³, N. V. Klovach²¹ Institute of Gene Biology Russian Academy of Sciences (FSBIS «IGB RAS»), Moscow, Russia² Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSBSI «VNIRO»), Moscow, Russia³ Russian State Agrarian University — Timiryazev Agricultural Academy (FSBEI HE «RSAU Timiryazev AA»), Moscow, Russia

The results of the study of macro- (Ca, Mg) and micro- (Mn, Zn, Cu, Fe) elements content in the pectoral fin tissue of adult sockeye salmon *Oncorhynchus nerka* from the rivers Bolshaya and Kamchatka as well as from Azabachye Lake (Kamchatka Peninsula) are presented. The significant differences in the contents in samples from the three waterbodies were found. It was ascertained that the largest ash proportion (and the mass fraction of trace elements) in dry matter contained in the tissues of sockeye salmon from Kamchatka River, the smallest in the sample of Azabachye Lake. The Ca content was 98% of the ash mass in all samples; Mg accounted for slightly less than 2%. The proportion of the remaining elements varied within 0.1%, and exactly in this range the differences in the microelement composition between the samples were revealed. In sockeye salmon tissues from the Kamchatka River, the content of heavy metals as well as Ca and Mg was higher than in other samples, and their percentage ratio considerably differed from the others. Obviously, the water bodies studied sufficiently distinguish in hydrochemical indices, and that is the cause of differences in bioaccumulation intensities of trace elements in fish tissues at the freshwater life stage.

Keywords: sockeye salmon *Oncorhynchus nerka*, Kamchatka Peninsula, microelements, mineral content.

DOI: 10.36038/2307-3497-2020-179-26-36

REFERENCES

- Alekin O. A. 1975. Himiya ozer [Chemistry of Lakes] // Hidrologiya ozer i vodohranilishch [Hydrology of lakes and reservoirs] M.: MGU. ch. I. S. 32–46.
- Bazarkina L. A. 2002. K probleme povysheniya kormovykh resursov molodi nerki v ozere Azabach'e [On the problem of increasing the forage resources of juvenile sockeye salmon in Lake Azabachye] // Issledovanie vodnykh biologicheskikh resursov kamchatki i severo-zapadnoj chasti Tihogo okeana. Vyp. 6. S. 251–259.
- Bugaev A. V. 2015. Prednerestovye migracii tihookeanskikh lososej v ekonomicheskoy zone Rossii [Prespawning migrations of pacific salmon in the exclusive economic zone of Russia]. Petropavlovsk-Kamchatskij: Izd-vo KamchatNIRO. 413 s.
- Bugaev V. F. 1995. Aziatskaya nerka (presnovodnyj period zhizni, struktura lokal'nyh stad, dinamika chislennosti) [Asian sockeye salmon (freshwater life, structure of local herds, population dynamics)]. Kolos. 463 s.
- Bugaev V. F., Kirichenko V. E. 2008. Nagul'no-nerestovye ozera aziatskoj nerki (vklyuchaya nekotorye drugie vodoemy areala) [Rearing and spawning lakes for Asian sockeye salmon stocks]. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchatpress. 280 s.
- Bugaev V. F., Ostroumov A. G., Nepomnyashchij K. Yu., Maslov A. V. 2002. Nekotorye osobennosti biologii nerki *Oncorhynchus nerka* r. Bol'shoj (Zapadnaya Kamchatka) i faktory, vliyayushchie na ee biologicheskie pokazateli [Some features of the biology of the sockeye salmon *Oncorhynchus nerka*

- of the Bolshoi R. (Western Kamchatka) and factors influencing its biological indicators] // *Izvestiya TNIRO*. T. 130. S. 758–776.
- Vvedenskaya T.L., Ukolova T.K., Sviridenko V.D.* 2006. Gidrohimičeskaya harakteristika reki Bol'shaya (Kamchatka) [Hydrochemical characteristics of the Bolshaya River (Kamchatka)] // *Issledovanie biologičeskikh resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj časti Tihogo okeana*. Vyp. 6. S. 158–165.
- Ivanov A.A.* 2003. *Fish Physiology: Study Guide*. M.: Mir.
- Krohin E.M.* 1967. Materialy k poznaniyu karlikovoj krasnoj v oz. Dal'nee (Kamchatka) [Materials for the knowledge of dwarf red in L. Dalnee (Kamchatka)] // *Voprosy ihtologii*. Vyp. 3. S. 433–445.
- Kurenkov I.I.* 1999. Rezul'taty introdukcii kokani v ožera Kamchatki [The results of the introduction of kokanee to Kamchatka lakes]. // *Problemy ohrany i racional'nogo ispol'zovaniya bioresursov Kamchatki: Doklady oblastnoj nauchno-praktičeskoj konferencii*. Petropavlovsk-Kamčatskij: Kamčatskij pečatnyj dvor. S. 30–38.
- Kurenkov I.I.* 2005. Zooplankton ožera Kamchatki [Zooplankton of Kamchatka Lakes]. Petropavlovsk-Kamčatskij: KamchatNIRO. 178 s.
- Lepskaya E.V.* 2000. Fitoplankton oz. Azabach'e i ego rol' v pitanii massovyh vidov zooplanktona [Phytoplankton L. Azabachye and its role in the nutrition of mass species of zooplankton] // *Issledovanie biologii i dinamiki čislenosti promyslovyh ryb kamčatskogo shel'fa*. Kamčatskij pečatnyj dvor. Vyp. V. S. 152–160.
- Luk'yanova O.N.* 2007. Gidrohimičeskaya osnova bioproduktivnosti nerestovo-vyrostnyh lososevyh ožera [Hydrochemical basis of bioproductivity of spawning-growing salmon lakes] // *Avtoreferat dissertacii na soiskanie učennoj stepeni kandidata biologičeskikh nauk*. 22 s.
- Manevich A.G., Girina O.A., Malik N.A., Mel'nikov D.V., Ushakov S.V., Demyanchuk Yu.V., Kotenko L.V.* 2006. Aktivnost' vulkanov Kamchatki i Severnyh Kuril v 2005 g. [2005 activity of Kamchatka and Northern Kuriles volcanoes] // *Problemy eksplozivnogo vulkanizma (k 50-letiyu katastroficheskogo izverženiya vulkana Bezymannyj)*. Mat. pervogo mezhd. simp. Petropavlovsk-Kamčatskij. S. 76–86.
- Milovskaya L.V.* 2006. Vliyanie uslovij nagula molodi nerki v ožere Kuril'skoe na strukture cheshui, razmery pokatnikov i vyzhivaemost' pokolenij [Effect of juvenile sockeye salmon feeding conditions in Kurilskoye Lake in scale structure, smolt size and generational survival] // *Issledovanie vodnyh biologičeskikh resursov Kamchatki i Severo-Zapadnoj časti Tihogo okeana*. Vyp. 8. S. 166–187.
- Pyrsikov A.S.* 2017. Rost i rybovodno-fiziologičeskie pokazateli tilyapii pri vyrashčivanii na kombikormah s dobavkoj «metabolit plyus» [Growth and fish-physiological indicators of tilapia when grown on compound feeds with the addition of “metabolite plus”]. *Avtoref. dis. kan. s.h nauk*. 20 s.
- Resursy poverhnostnyh vod SSSR* [Surface Water Resources of the USSR] 1973. L.: Gidrometeoizdat. Kamchatka. T. 20. 367 s.
- Sklyarov V. Ya.* 2008. Korma i kormleniye ryb v akvakul'ture [Feed and feeding of fish in aquaculture]. M.: Izd-vo VNIRO. 150 s.
- Smirnov A.I.* 1975. Biologiya, razmnoženie i razvitie tihookeanskih lososej [Pacific Salmon biology, breeding and development]. M.: MGU. 335 s.
- Sorvachev K.F.* 1982. Osnovy biokhimii pitaniya ryb [Fundamentals of biochemistry of fish nutrition]. M.: Legkaya i pishhevaya promyshlennost'. 247 p.
- Chereshnev I.A., Volobuev V.V., Shestakov A.V., Frolov S.V.* 2002. Lososevidnye ryby Severo-Vostoka Rossii [Salmonoid fishes in Russian North-East] Vladivostok: Dal'nauka. 496 s.
- Shekhanova I.A.* *Nekotorye voprosy fosfornogo obmena u ryb* [Some questions of phosphorus metabolism at fish] // *Trudy VNIRO*. 1961. T. 46. S. 60–77.
- Shcherbina M.A., Gamygin E.A.* 2006. Kormleniye ryb v presnovodnoj akvakul'ture [Feeding of fish in freshwater aquaculture]. M.: Izd-vo VNIRO. 360 s.
- Yarockij G.P.* 2013. Dikij tihookeanskij losos' Severo-Zapada Pacifiki. Fenomen i put' spaseniya [Wild Pacific Salmon of the Northwest Pacific. The phenomenon and the way of salvation]. Kamchatka i Koryakiya. Saarbrücken, Germaniya: LAP LAMBERT Academic Publishing. 273 s.
- Burgner R.L.* 1991. Life history of Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*) // *Pacific Salmon Life Histories*. / C. Groot and L. Margolis ed. UBC Press. Canada. P. 3–117.

FIGURE CAPTIONS

Fig. 1. Map of the working area and collection points

Fig. 2. Boxplot diagrams of leach content (%) and mineral elements (g, mg) per 100 g of the leach, showing the main characteristics of the distributions: median (bold horizontal line), 1 and 3 quartiles (box borders), the edges of a statistically significant sample without outliers (whiskers ends) and outliers (circles), sample ID's are as in Table. 1

Fig. 3. The ratio of micronutrients in sockeye fins from different watersheds of Kamchatka

TABLE CAPTIONS

Table 1. Mineral composition of sockeye salmon fin tissue from different watersheds of the Kamchatka Peninsula

Table 2. *P*-values, according to the results of Mann-Whitney *u*-test on the estimates of macro- (Ca, Mg) and micronutrient (Zn, Fe, Mn, Cu) content in sockeye salmon tissue from different watersheds of Kamchatka; designations of samples as in Table. 1