

**ДИНАМИКА ВЫМЫВАНИЯ ФОСФОРА И НЕКОТОРЫХ
МЕТАЛЛОВ ИЗ КОСТЕЙ ПОСТНЕРЕСТОВОЙ НЕРКИ
В РЕЧНОМ И ОЗЕРНОМ БИОТОПАХ ОЗ. КУРИЛЬСКОЕ
(КАМЧАТКА)**

Е.В. Лепская¹, А.В. Кучерявый²

¹*Камчатский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, ул. Набережная, 18, Петропавловск-Камчатский, 6830000, Россия. E-mail: lepskaya@list.ru*

²*Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Ленинский пр-т, 33, Москва, 119071, Россия. E-mail: scolopendra@bk.ru*

На основании данных экспериментов, проведенных в природной среде, описана динамика изменений содержания фосфора, кальция, калия, железа, стронция, меди и цинка в разных частях скелета постнерестовой нерки. Предполагается, что время полной экстракции этих элементов из костей составляет не менее трех лет.

**DYNAMICS OF THE PHOSPHORUS AND SOME METAL
EDUCTION FROM THE SKELETON OF THE DEAD POST
SPAWNING NERKA IN RIVER AND LAKE BIOTOPES
OF THE KURILSKOYE LAKE (KAMCHATKA)**

E.V. Lepskaya¹, A.V. Kucheryavyy²

¹*Kamchatka Institute for Fisheries Research and Oceanography, 18 Naberezhnaya Str., Petropavlovsk-Kamchatsky, 6830000, Russia. E-mail: lepskaya@list.ru*

²*A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, 33 Leninskii Avenue, Moscow, 119071, Russia. E-mail: scolopendra@bk.ru*

According to data of the experiments *in vivo* the dynamic of the quantitative changes of the phosphorus, calcium, potassium, iron, strontium, copper, and zinc in different parts of nerka skeleton is described. It is assumed that the time of full extraction of these elements from fish bones in Kurilskoye Lake is not less than three years.

Пополнение экосистемы любого лососевого водоема биогенными элементами и поддержание их баланса происходит, в значительной степени, благодаря рыбам, «возвращающим» эти вещества из моря после гибели на нерестилищах (Крохин, 1967; Введенская и др., 2006). Это особенно важно для фосфора, массо-

вая доля которого в вулканических породах, выстилающих дно оз. Курильское, не превышает 0,06 % (Действующие..., 1991).

Вопрос о скорости и времени вымывания фосфора и других биогенных элементов из тел погибших после нереста лососей, как в речных, так и в озерных экосистемах, пока остается открытым. В последнее время показано, что пути превращения каркасных биогенных элементов в водорастворимые доступные для первичных продуцентов соединения, весьма многообразны и локализуются как в самих водных биотопах, так и в наземных. В воде в трансформации участвуют различные микробиологические сообщества, а также беспозвоночные и позвоночные макродеструкторы (Кириллова, 2009; Кучерявый и др., 2010). На нерестилищах и берегах водоемов – это мелкие и крупные позвоночные: норки, горностаи, лисы, медведи (Паренский, 2005; устное сообщение А.В. Маслова) и птицы, прежде всего, вороны, вороны, орланы (Лобков, 2008; устное сообщение А.В. Маслова). Показано, что в холодноводном оз. Курильское с замедленным водообменом, время реакции видовой структуры планктонного диатомового доминантного комплекса на поступление каркасного фосфора составляет не менее трех лет (Лепская, 2009).

Цель настоящей работы – на основании анализа экспериментальных данных описать динамику вымывания фосфора и некоторых металлов из костей постнерестовой нерки и дать предварительную оценку скорости этого процесса и времени поступления этих элементов в водную среду.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Фрагменты рыбных скелетов для постановки эксперимента были собраны в начале июня 2009 г. на осушенных нерестилищах в истоке р. Озерная, вытекающей из оз. Курильское. Экспериментальные образцы, представлявшие собой смесь различных частей скелета, помещали в плоские мешки 10 × 15 см, изготовленные из газа № 70 и № 15, и подвешивали на тросах в озере недалеко от истока р. Озерная, растянув на буйках, и в реке Озерной, прикрепив к сваям рыбоучетного заграждения. Экспозицию начали 23 июня, образцы на анализ вынимали каждые 10 дней. Для определения элементов кости предварительно отмывали в трех порциях дистиллированной воды, предполагая, что таким образом будет минимизировано влияние биоты, использовавшей кости как субстрат для заселения, высушивали и хранили в пергаментных конвертах в темном сухом прохладном месте. Определение элементов (фосфора – Р, калия – К, кальция – Са, железа – Fe, стронция – Sr, меди – Cu и цинка – Zn) проводили в разных частях скелета рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре Roentek Picotax (Bruker, Германия).

В описании результатов использовали данные по содержанию биогенных элементов, осредненные для образцов, экспонировавшихся в мешках из мелкого и крупного газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего, оговоримся, что в тексте описываются изменения в *содержании биогенных элементов* в костной ткани, которые дают основания судить о, собственно, процессе вымывания.

По нашим наблюдениям, на нерестилищах оз. Курильское и его притоков, а также в реках Утхолук и Коль мягкие ткани рыб разлагаются в течение 1–3 месяцев после постнерестовой гибели, тогда как скелет может сохраняться год и более. Часть скелетов рыб, сохранившихся до весны следующего года, поедают млекопитающие, в основном лисы и медведи, однако кости рыб, которые замываются на дне речных и озерных литоральных нерестилищ, животным недоступны. Учитывая, что в оз. Курильское 71 % нерки нерестится в литорали, можно предположить, что ежегодно на дне прибрежного мелководья остается 1–16 т фосфора и других биогенных элементов в составе рыбных костей.

Кости, использованные в эксперименте, остались, вероятнее всего, от рыб, отнерестившихся осенью. Трупы рыб от зимнего нереста практически полностью выедаются крупными птицами, в основном белоплечими орланами, а также медведями и лисами (устное сообщение А.В. Маслова). Таким образом, кости пролежали на дне реки не менее 5 месяцев, периодически осушаясь в зимне-весеннюю межень. Позвонки и ребра были полностью свободны от мягких тканей, а челюсти и кости черепа частично были покрыты кожей и хрящом.

Первоначальное содержание биогенных элементов (БЭ) в разных частях скелета различалось на один–два порядка (табл. 1).

Таблица 1

Начальное содержание биогенных элементов (мг/кг костей) в различных частях скелета постнерестовой нерки

Часть скелета	P	Ca	K	Fe	Sr	Cu	Zn
Жаберные крышки (ЖК)	2186,9	958	931,9	31591,4	153,4	-	86,9
Нижние челюсти (НЧ)	4075,7	423,9	932,8	33958,8	119,4	-	-
Позвонки и позвонки с ребрами (ПР)	27020,1	3847,6	4746,8	172793,9	910,5	-	325,1
Головной хрящ (ГХ)	3144,6	1644,7	964,4	18243,4	82,7	315,1	191,6

Примечание: здесь и в табл. 2, 3 прочерк означает отсутствие данных.

Максимальное содержание биогенных элементов характерно для позвонков и позвонков с ребрами (ПР). По содержанию фосфора выделяются также нижние челюсти (НЧ) и головной хрящ (ГХ). Наименьшее количество этого элемента определено в жаберных крышках (ЖК). Значительное количество кальция аккумулировано в ГХ, тогда как в ЖК и НЧ в 2–8 раз меньше по сравнению с ПР и ГХ. Содержание калия в ЖК, НЧ и ГХ практически одинаково и в 5 раз меньше, чем в ПР. То же характерно и для содержания железа в ЖК и НЧ, тогда как в ГХ его в 10 раз меньше, чем в ПР. По содержанию стронция ЖК, НЧ и ГХ мало отличаются друг от друга, хотя в последних его несколько меньше. Но все эти части скелета содержат стронция в 9–10 раз меньше, чем ПР. По содержанию цинка второе место после ПР занимает ГХ, а в ЖК и НЧ его содержание в 4 раза меньше.

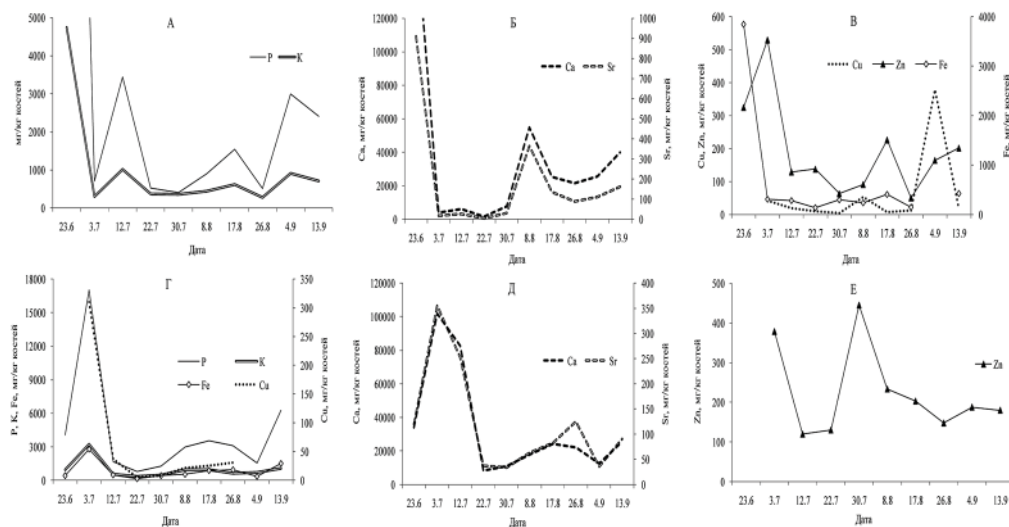


Рис. 1. Изменение содержания биогенных элементов в позвонках (А, Б, В) и челюстях (Г, Д, Е) при экспозиции в озере.

В озере динамика вымывания биогенных элементов из различных частей скелета отличается только на начальном этапе (рис. 1).

В позвонках содержание всех биогенных элементов кроме Zn резко уменьшилось в первую же десятидневку: Р в 38, К в 16, Са в 43, Fe в 12, Sr в 50 раз. Сходство в изменении содержания прослеживалось у Р и К (рис. 1А) и у Sr и Са (рис. 1Б). В изменении содержания Fe, Cu и Zn закономерностей не обнаружено (рис. 1В). У Р и К увеличение содержания происходило трижды: на двадцатый, шестидесятый и восьмидесятый дни с начала экспозиции. У Са и Sr первое увеличение содержания отмечено на пятидесятый день эксперимента, второе – на девяностый. В начале сентября содержание Cu увеличилось в 17 раз по сравнению со средним для предыдущих восьмидесяти дней значением, но через десять дней к концу эксперимента снова уменьшилось до тех же значений. В содержании Zn примерно каждые тридцать дней происходило его увеличение в 2–4 раза по сравнению с предыдущими минимальными значениями.

В челюстях для всех БЭ кроме Zn, было характерно увеличение содержания в первую декаду эксперимента в 3–6 раз. Сопряженность в изменении содержания также отмечена для всех БЭ, кроме Zn (рис. 1Г, Д, Е). Для Р, К, Fe, Cu (рис. 1Г) и Са, Sr (рис. 1Д) после достижения минимальных величин на тридцатый день эксперимента наблюдали плавное увеличение содержания вплоть до окончания экспозиции до конечного значения, втрое превышающего минимальное. В первые тридцать дней эксперимента содержание Zn в челюстях изменялось аналогично таковому других БЭ (рис. 1Е), но на сороковой день произошло резкое его увеличение до первоначального значения, сменившееся плавным снижением до конца эксперимента.

В реке содержание всех БЭ, как в позвонках, так и в костях челюстей снижалось в 2–100 раз в первые тридцать дней экспозиции (рис. 2).

В позвонках изменение содержания Р, Са (рис. 2А) и Sr (рис. 2Б) происходило синхронно, уменьшаясь в 100, 40 и 50 раз соответственно, в первые 10 дней и

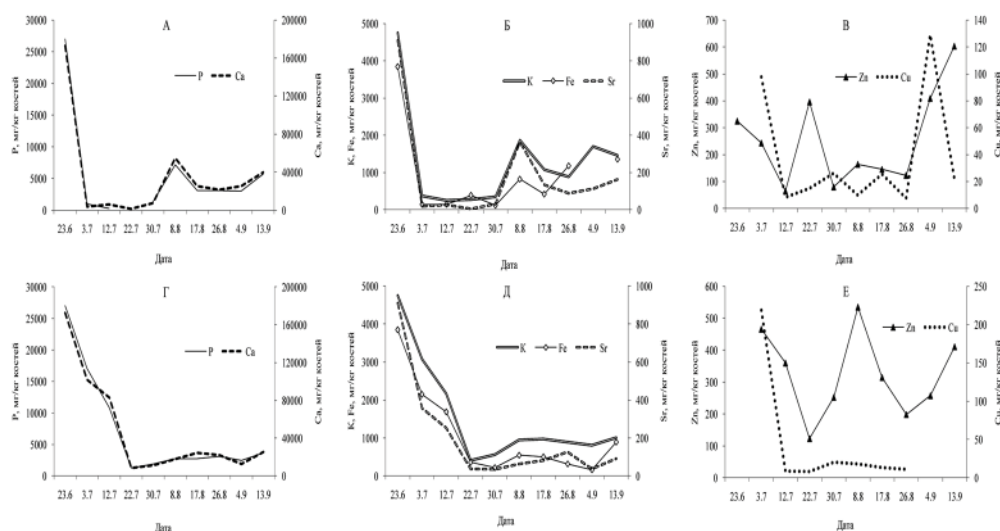


Рис. 2. Изменение содержания биогенных элементов в позвонках (А, Б, В) и челюстях (Г, Д, Е) при экспозиции в реке.

незначительно: в 28, 14 и 20 раз по сравнению с минимальными значениями соответственно, увеличиваясь на пятидесятый день эксперимента. В течение первых пятидесяти дней изменения содержания К и Fe происходят также как и изменения содержания Р, Са и Sr (рис. 2Б). Далее для К и Fe отмечено некоторое уменьшение в содержании с последующим нерегулярным нарастанием. В отличие от Р, Са, Sr, К и Fe первое значительное уменьшение содержания Zn и Cu в пять и двенадцать раз соответственно, наблюдали не через десять, а через двадцать дней после начала эксперимента (рис. 2В). В процессе экспозиции отмечено увеличение содержания по сравнению с первоначальным значением для Cu в 1,3 раза на восьмидесятый день, а для Zn в 1,2 и 1,9 раз на тридцатый день и в конце эксперимента соответственно.

Связи изменения содержания БЭ в позвонках с сезонной динамикой температуры и уровня при экспозиции в реке не обнаружено. Во всех случаях абсолютное значение коэффициента корреляции было менее 0,3. Для Р, Са, К, Fe и Sr сопряженность с температурой воды имела положительную направленность, а для Cu и Zn отрицательную.

В *челюстях* содержание Р, Са, К, Fe, Sr и Zn уменьшалось до минимальных значений на тридцатый (рис. 2Г, Д, Е), а Cu на двадцатый (рис. 2Е) дни эксперимента. Изменения содержания Р, Са, К, Fe, Sr происходили синхронно. Содержание Cu после снижения до минимума в первые двадцать дней оставалось на этом уровне на протяжении всего эксперимента. Для Zn отмечено два пика в содержании, по мощности сравнимых с первоначальным значением на пятидесятый день и в конце эксперимента (рис. 2Е).

Содержание Р, К, Са и Fe уменьшалось по мере прогрева речной воды ($r = -0,7$ при $n = 9-10$ и $p < 0,05$). То же происходило и с Sr, Cu и Zn, однако связь их с сезонной динамикой температуры воды была менее выражена, $r = -0,5$ при $n = 9-10$ и $p < 0,05$.

Вымывание биогенных элементов из скелетов рыб в лососевых водоемах – это сложный процесс, в котором задействованы химические и микробиологиче-

Таблица 2

Изменение содержания биогенных элементов в скелете нерки при экспозиции в озере

Месяц	Биогенные элементы, мг/кг костей						
	P	Ca	K	Fe	Sr	Cu	Zn
Июнь	15548	103376	2840	2136	515	-	325
Июль	3838	35581	930	728	120	66	266
Август	2474	25237	691	615	125	26	281
Сентябрь	3503	23576	827	752	88	197	392
Часть БЭ, вымытая в первый месяц	3/4	2/3	2/3	2/3	3/4	-	-

Таблица 3

Изменение содержания БЭ в скелете нерки при экспозиции в реке

Месяц	Биогенные элементы, мг/кг костей						
	P	Ca	K	Fe	Sr	Cu	Zn
Июнь	15548	103376	2840	2136	515	-	325
Июль	4352	27889	932	650	95	50	248
Август	3651	27614	1105	630	143	14	246
Сентябрь	3711	25873	1241	643	100	78	420
Часть БЭ, вымытая в первый месяц	3/4	3/4	2/3	2/3	4/5	-	-

ские составляющие. Несомненно, на него влияет и гидрохимический фон самих водоемов, и сезонность в поступлении БЭ с нерестовой рыбой, и развитие планктонного и бентосного населения в самом водоеме. Очевидно, что наряду с извлечением БЭ из костей, в них же происходит и накопление, обусловленное тем, что кости используются различными микроорганизмами в качестве субстрата.

Наши исследования показали, что динамика вымывания сопряженных БЭ (P, Ca, K, Sr и Fe) из разных частей скелета имела свои особенности и зависела, вероятно, от различий в структуре костной ткани позвонков и костей черепа. Например, в позвонках содержание БЭ уменьшалось в первые десять дней эксперимента, как в озере, так и в реке, тогда как в челюстях только на тридцатый день.

Для того чтобы рассчитать время вымывания БЭ из костей, использовали средние значения их содержания в скелете за каждый месяц эксперимента (табл. 2, 3).

Исходя из данных, представленных в таблицах 2 и 3, в первый месяц экспозиции вымывается в озере и реке 3/4 от первоначального содержания P, 2/3–3/4 от первоначального содержания Ca, 2/3 – K и Fe, и 3/4–4/5 содержания Sr. При этом активнее всего вымывание происходит в первые десять–двадцать дней (рис. 1 и 2). Вероятно, в этот период P, K и Fe вымываются с одинаковой скоростью и в озере, и в реке, Ca и Sr быстрее извлекаются из костей в речной воде (табл. 2 и 3). В августе и сентябре вымывание БЭ, вероятно, уравнивается их аккумуляцией внутри костной ткани, за счет ее заселения микроорганизмами.

Для предварительной оценки времени полной экстракции БЭ из костной ткани рыб в естественных условиях предположили, что 1) основное вымывание происходит в начале лета; 2) каждый раз вымывается не менее 3/4 от первоначального

содержания. Тогда время, необходимое для полного вымывания БЭ, прежде всего, фосфора из скелетов отнерестовавших рыб, должно составить не менее трех лет.

Для Cu и Zn изменение содержания в костях отличалось, как от других БЭ, так и между собой. Мы полагаем, что таким образом выразилось влияние как особенностей нахождения этих элементов в костной ткани (для Cu), так и гидрохимического фона воды оз. Курильское, расположенного в зоне активного вулканизма и в связи с этим имеющего повышенное содержание Zn (Степанов, Фаистова, 1986).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Любовь Андреевну Пельгунову и Алексея Викторовича Маслова за всемерную помощь в постановке эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

- Введенская Т.Л., Уколова Т.К., Свириденко В.Д. 2006.** Гидрохимическая характеристика реки Большая (Камчатка) // Исслед. водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. Вып. 8. Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. С. 158–165.
- Действующие вулканы Камчатки. 1991.** Т. 2. М.: Наука. 415 с.
- Кириллова Е.А. 2009.** Некоторые особенности биологии кижуча *Oncorhynchus kisutch* первого года жизни в реках Утхолок и Калкавеем (Северо-Западная Камчатка) // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Вып. 4. Владивосток: Дальнаука. С. 292–301.
- Крохин Е.М. 1967.** Влияние размеров пропуска производителей красной на фосфатный режим нерестовых озер // Изв. ТИНРО. Т. 57. С. 31–54.
- Кучерявый А.В., Пельгунова Л.А., Саввантова К.А., Павлов Д.С. 2010.** Влияние миног и некоторых других животных на утилизацию вещества морского происхождения в лососевых реках // Изв. ТИНРО. Т. 163. С. 152–161.
- Лепская Е.В. 2009.** Время трансформации каркасного фосфора в разнотипных озерах Камчатки // X Съезд Гидробиологического общества при РАН. Тез. докл. (г. Владивосток, 28 сентября–2 октября 2009 г.). Владивосток: Дальнаука. С. 235.
- Лобков Е.Г. 2008.** Птицы в экосистемах лососевых водоемов Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатпресс. 96 с.
- Паренский В.А. 2005.** Роль медведей в динамике численности лососей Камчатки // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: матер. VI научн. конф. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатпресс. С. 132–136.
- Степанов В.В., Фаистова Е.Ф. 1986.** Микроэлементный состав вод оз. Курильского // Комплексные исследования озера Курильского (Южная Камчатка). Владивосток: Изд-во Дальневосточного университета. С. 143–148.