

Микроэлементный состав костной ткани тетеревиных и сов Урала

В. С. БЕЗЕЛЬ*, Е. А. БЕЛЬСКИЙ*, Н. Г. КУРАМШИНА**, Л. Н. МАРТЫНЕНКОВА**

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144 Екатеринбург, ул. 8-го Марта, 202

**Башкирский государственный аграрный университет
450001 Уфа, ул. 50 лет Октября, 34

АННОТАЦИЯ

Проанализировано накопление Pb, Ni, Cd, Mo, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr и Hg в костной ткани тетеревиных (*Tetrao urogallus*, *Lyrurus tetrrix*, *Tetrastes bonasia*) и совиных (*Strix nebulosa*, *S. uralensis*), собранных на Приполярном, Северном, Среднем и Южном Урале. Отмечена видовая специфика в уровнях накопления Cr, Pb, Ni, Cd, Mo и Hg. Дискриминантный анализ химического состава позволил дифференцировать выборки: 1) глухарь и тетерев, 2) рябчик, 3) бородастая и длиннохвостая неясыти. Проведено сравнение аккумуляции элементов у двух трофических групп: консументы 1-го (тетеревиные) и 2-го порядков (совы). Ni и Cd в большей степени накапливаются у птиц-фитофагов, а Pb и Mo – у хищных птиц. Наблюдаемые различия, вероятно, отражают специфику пищевых рационов. Проведено сравнение химического состава тетеревиных Урала и Кировской области.

Распределение химических элементов в объектах окружающей среды – наиболее информативный показатель интенсивности биогеохимических циклов, реализуемых в виде миграции элементов по пищевым цепям. Поскольку живые организмы связаны между собой трофическими взаимоотношениями, миграция химических веществ по трофическим уровням представляет собой наиболее значимый фактор участия живых организмов в глобальном и региональном потоке вещества и энергии. Спектр химических элементов и их концентрации в живых организмах представляют собой базовую характеристику для оценки их роли в биогеохимических циклах [1].

Участие живого в круговороте веществ определяется комплексом био- и абиогенных факторов, которые необходимо учитывать при сравнении особенностей аккумуляции элементов разными организмами. Один из

них – эволюционное родство, отражаемое систематическим положением. Отмечено сходство элементного состава у систематически близких организмов [2]. Еще один важный фактор – это уровни химических элементов в объектах внешней среды. Такие явления, как эндемические болезни, вызванные дефицитом или избытком тех или иных микроэлементов [3], или биоаккумуляция ксенобиотиков в условиях техногенного загрязнения [4] демонстрируют тесную связь химического состава биоты и ее окружения. Тем самым своеобразие спектра элементов в организме животных конкретных регионов позволяет использовать его не только для выявления естественных и антропогенных биогеохимических аномалий, но и в качестве маркера географических популяций животных [5].

Вместе с тем существует специфика химического состава даже у родственных организмов. В основе таких различий лежат не

только физиологические особенности, но и, главным образом, трофические связи, определяющие элементный состав потока веществ, проходящего через организм.

Цель работы – характеристика химического состава птиц фоновых (незагрязненных) территорий Урала и специфики накопления элементов у двух семейств, представляющих разные трофические уровни.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Материалом для исследования послужила костная ткань птиц двух семейств: тетеревиных (Tetraonidae, Galliformes) и совиных (Strigidae, Strigiformes). В сборах представлены следующие виды: глухарь *Tetrao urogallus* L., рябчик *Tetrastes bonasia* L., тетерев *Lyrurus tetrrix* L. (Tetraonidae), а также неясыти: бородатая *Strix nebulosa* Forster и длиннохвостая *Strix uralensis* Pall. (Strigidae). Перечисленные виды оседлы, и, следовательно, химический состав их организма отражает уровни элементов в объектах среды конкретной локальной территории. Выбор двух

семейств обусловлен тем, что они представляют разные трофические уровни: консументов первого (фитофаги) и второго (хищники) порядков. Следовало ожидать, что различия химического состава у двух этих групп обусловлены в первую очередь их положением в трофической цепи.

Пробы птиц собраны в 13 точках Урала: от Приполярного до Южного (табл. 1, рис. 1). Большая часть птиц отстреляна охотниками в осенний период, часть – обнаружена в виде костно-перьевых остатков. В анализе использовали главным образом цевки птиц, реже – кости таза. Перед анализом кости очищали от остатков мягких тканей, кожи и костного мозга, промывали в дистиллированной воде и высушивали на воздухе.

Пробоподготовку проводили методом “мокрого” озоления. Навеска костной ткани составляла от 0,1 до 0,5 г. Концентрации Pb, Ni, Cd, Mo определяли методом атомной абсорбции с графитовым атомизатором (Сатурн-3П); Fe, Mn, Zn, Cu, Cr – на спектрофотометре “Квант-АФА” с пламенным анализатором, Hg – на ртутном анализаторе “РА-915”.

Т а б л и ц а 1
Места сбора и количество проб птиц

№ п/п	Район	Код *	Виды птиц				
			Глухарь	Рябчик	Тетерев	Бородатая неясыть	Длиннохвостая неясыть
Тюменская область							
1	Шурышкарский	ПП	1				
2	Березовский	ПП	1	3			
Свердловская область							
3	Ивдельский	С		2			
4	Карпинский	С	5	3	4	1	
5	Богдановичский	В	3	1	3	3	1
6	Сухоложский	В	1				
7	Березовский	В			1		
8	Асбестовский	В				1	
9	Висимский заповедник	З	1				
10	Шалинский	З	2		2	1	1
11	Нижнесергинский	З		1			
12	Сысертский	Ю	1			2	4
Челябинская область							
13	Кунашакский	Ю	1			3	2
	Всего		16	10	10	11	8

*Условное обозначение локальных географических популяций: ПП – приполярные, С – североуральские, З – из западной части Среднего Урала, В – из восточной части Среднего Урала, Ю – южно-уральские.

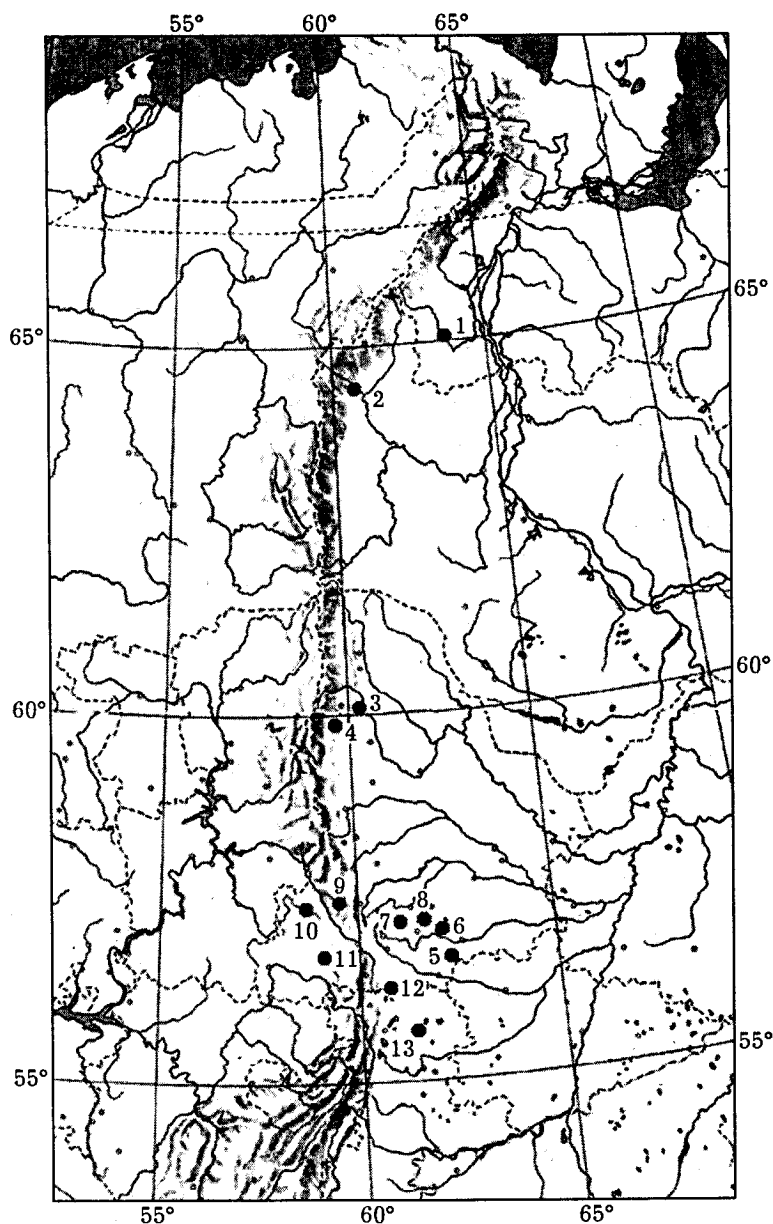


Рис. 1. Расположение мест сбора проб. Номера точек сбора материала соответствуют таковым в табл. 1.

Достоверность различий химического состава у разных видов проверяли методом однофакторного дисперсионного анализа. Мету дифференциации видовых выборок определяли при дискриминантном анализе, используя квадратичные дистанции Махаланобиса. При анализе особенностей накопления элементов птицами разных трофических уровней мы рассчитывали средние значения элементов в двух выборках, объединив в одну три вида тетеревиных, а в другую – оба вида сов. Сравнение средних концентраций элементов в скелете у двух групп консументов

проводили попарно с использованием *t*-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Средние концентрации изучаемых элементов в костной ткани птиц приведены в табл. 2. Для выявления видовой специфики химического состава птиц проведен дисперсионный анализ. Он показал статистически недостоверные различия в содержании в костных тканях таких металлов, как Mn ($p = 0,76$), Fe ($p = 0,35$), Cu ($p = 0,10$), Zn ($p = 0,50$). В

Средние концентрации металлов в костных тканях птиц (\pm ошибка), мкг/г воздушно-сухой массы

Вид	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	Mo	Hg
Глухарь, n = 16	15,2 \pm 5,2	43,7 \pm 10,9	13,1 \pm 4,3	185,5 \pm 18,6	5,6 \pm 1,8	0,26 \pm 0,10	3,7 \pm 1,1	1,4 \pm 0,6	0,05 \pm 0,05	0,02 \pm 0,01
Рябчик, n = 10	10,7 \pm 1,7	19,0 \pm 2,2	5,0 \pm 1,6	206,3 \pm 24,4	0,1 \pm 0,1	0,03 \pm 0,01	1,6 \pm 0,4	2,7 \pm 1,1	Н.п.*	Н.п.
Тетерев, n = 10	13,1 \pm 2,4	49,3 \pm 15,4	6,0 \pm 1,7	177,1 \pm 15,4	3,1 \pm 0,9	0,03 \pm 0,01	1,8 \pm 0,5	0,1 \pm 0,1	»	»
Бородатая неясыть, n = 11	10,3 \pm 0,9	39,6 \pm 6,4	3,3 \pm 0,1	174,4 \pm 5,3	1,4 \pm 0,8	0,01 \pm 0,00	3,5 \pm 0,5	0,3 \pm 0,1	1,36 \pm 0,65	0,01 \pm 0,00
Длиннохвостая неясыть, n = 8	9,3 \pm 0,6	34,5 \pm 4,7	3,5 \pm 0,2	158,4 \pm 11,0	0,3 \pm 0,3	0,01 \pm 0,00	3,0 \pm 0,5	0,7 \pm 0,6	3,5 \pm 2,2	0,01 \pm 0,00

*Н.п. - ниже предела обнаружения.

то же время уровни Pb, Ni, Cd, Mo, Hg, Cr по данным дисперсионного анализа достоверно отличаются у птиц различного вида.

Дальнейший анализ видовой специфики накопления металлов в костной ткани тетеревиных и сов проводили методом дискриминантного анализа. На первом этапе использован комплекс данных по концентрациям десяти элементов в 55 образцах (пять видов рассмотрены индивидуально).

Пространство этих десяти показателей отображается на плоскости двух компонент, на которой исходные данные концентраций представлены в виде соответствующих точек. Расстояние между ними характеризует близость изучаемого минерального состава костных тканей всех видовых групп птиц. Можно соотнести меру дифференциации пяти видовых выборок, используя квадратичные дистанции Махаланобиса (SMD) и статистического уровня значимости различий (p -уровень). Результаты анализа приведены в табл. 3а, правая верхняя треугольная матрица которой содержит значение SMD, нижняя - уровень значимости. Различия достоверны при $p < 0,05$. Низкие значения SMD имеют выборки, принадлежащие глухарю и тетереву, а также обоим видам неясытей. Таким образом, различия по микроэлементному составу костных тканей между видами в этих парах несущественны.

Полученные результаты позволили объединить не различающиеся виды и продолжить дискриминантный анализ на трех выборках: глухарь и тетерев, рябчик и оба вида сов. Анализ объединенных выборок показал, что выделенные нами группы видов удовлетворительно дифференцируются по показателю квадратичных дистанций Махаланобиса при уровне значимости $p < 0,05$ (табл. 3б).

На рис. 2 представлено расположение объединенных выборок микроэлементного состава костных тканей на плоскости дискриминантных функций (95 % доверительные эллипсоиды). Качество выполненной дифференциации можно характеризовать эффективностью классификации исходных выборок концентраций металлов, выполненной в рамках дискриминантного анализа и составляющей для совместной выборки глухаря и те-

Т а б л и ц а 3а

Результаты дискриминантного анализа выборок птиц.

В правой верхней половине таблицы приведены квадратичные дистанции Махаланобиса, в левой нижней – уровень значимости p . Жирным шрифтом выделены достоверные различия

Видовые выборки	Глухарь	Рябчик	Тетерев	Бородатая неясыть	Длиннохвостая неясыть
Глухарь	–	8,12	3,78	10,60	8,94
Рябчик	< 0,01	–	6,38	10,70	7,66
Тетерев	0,103	< 0,01	–	12,36	10,34
Бородатая неясыть	< 0,001	< 0,001	< 0,001	–	0,86
Длиннохвостая неясыть	< 0,01	< 0,05	< 0,01	0,98	–

Т а б л и ц а 3б

Выборки после объединения	Глухарь и тетерев	Рябчик	Бородатая и длиннохвостая неясыти
Глухарь и тетерев	–	6,39	9,33
Рябчик	< 0,01	–	8,80
Бородатая и длиннохвостая неясыти	< 0,001	< 0,001	–

терева 92,3 %, для выборки проб рябчика – 70 %, для обоих видов сов – 84,2 %. Общая вероятность правильного разделения таких выборок составляет 85,4 %.

Анализ особенностей накопления элементов птицами разных трофических уровней провели на объединенной выборке тетере-

виных (консументы 1-го порядка), с одной стороны, и сов (консументы 2-го порядка) – с другой. Попарное сравнение средних концентраций элементов в скелете у двух групп консументов показало, что уровни Mn, Fe, Cu и Zn статистически не различаются у выделенных трофических групп. Накопление

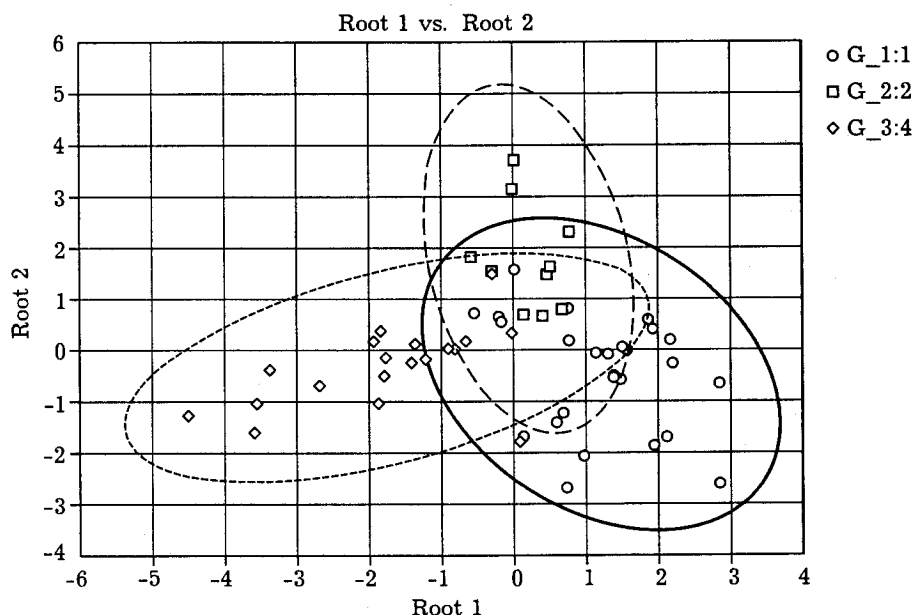


Рис. 2. Расположение объединенных выборок микроэлементного состава костных тканей птиц на плоскости дискриминантных функций (95 % доверительные эллипсоиды).

G₁:1 – объединенная выборка глухарей и тетеревов; G₂:2 – выборка рябчиков; G₃:4 – объединенная выборка бородатой и длиннохвостой неясытей.

двух металлов в костной ткани у птиц-фи-тофагов было больше, чем у хищных птиц. Так, средняя концентрация Ni составила соответственно $(1,44 \pm 0,44)$ и $(0,50 \pm 0,25)$ мкг/г воздушно-сухой массы, Cd – $0,13 \pm 0,05$ и $(0,006 \pm 0,002)$ мкг/г. У сов достоверно в большей степени, чем у тетеревиных, накапливались Pb и Mo. Среднее содержание Pb составило у тетеревиных $0,92 \pm 0,49$, у неясытей $(3,93 \pm 1,07)$ мкг/г, а Mo – соответственно $(0,02 \pm 0,02)$ и $(2,27 \pm 1,00)$ мкг/г. Различия в накоплении Cr находятся на грани достоверности ($p < 0,1$): $(2,55 \pm 0,52)$ и $(3,27 \pm 0,35)$ мкг/г у консументов 1-го и 2-го порядков соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Нами не отмечено значимых различий между видами в содержании в костных тканях Mn, Fe, Cu и Zn. Эти элементы выполняют важнейшие физиологические функции, и следует ожидать, что механизмы минерального гомеостаза контролируют постоянство их содержания в тканях и органах птиц. По этой причине перечисленные микроэлементы не обладают статистически значимой видовой спецификой. Видовые различия в накоплении следует ожидать в отношении остальных элементов, не относящихся к физиологически необходимым и по этой причине способных к пассивному транспорту через стенку желудочно-кишечного тракта. Поэтому уровни таких элементов в костных тканях птиц отражают их содержание в пищевых рационах. Именно эти элементы – Pb, Ni, Cd, Mo, Hg, Cr – по данным дисперсионного анализа достоверно отличаются у птиц различного вида.

Значительная часть опубликованных работ по интересующей нас тематике посвящена накоплению тяжелых металлов в условиях антропогенного загрязнения среды [4, 6–10]. В меньшей степени изучены уровни элементов в организме птиц на фоновых (незагрязненных) территориях [5, 11, 12]. В качестве основного фактора, формирующего химический состав тела птиц, следует рассматривать особенности пищевых рационов. В тканях видов, принадлежащих к одному трофическому уровню и обитающих в одном

биотопе, отмечено различное содержание химических элементов, способных пассивно всасываться в желудочно-кишечном тракте. Так, заселяющие одни и те же загрязненные участки мухоловка-пеструшка и большая синица подвержены разной токсической нагрузке за счет различного содержания в пище тяжелых металлов [10, 13, 14] и радионуклидов [15].

При всей выраженности видовых особенностей химического состава птиц в экстремальных геохимических условиях такие различия между видами проявляются и на фоновых (незагрязненных) территориях. Это наглядно иллюстрируют результаты выполненного нами дискриминантного анализа, позволившего изобразить выборки таксонов в виде специфических эллипсоид на плоскости дискриминантных функций (см. рис. 2). Мы не отметили значимых различий в содержании химических элементов у глухаря и тетерева (см. табл. 3а). Известно, что летние и осенние корма тетеревиных сходны [16]. Наибольшие различия отмечаются в зимний период, когда глухарь переходит на питание хвоей сосны, тетерев – концевыми побегами, почками и сережками берез, а рябчик – на аналогичный веточный корм, включающий широкий набор лиственных деревьев и кустарников. В то же время в северных районах Евразии, к которым можно отнести и район исследований, в состав зимнего рациона тетерева входят молодые шишечки и хвоя сосны, что сближает этот вид с глухарем [16]. Рябчик, в наибольшей степени отличающийся своим рационом от этих двух видов, обладает и наименьшим сходством с ними по химическому составу. Наблюдаемые различия в химическом составе разных видов тетеревиных связаны, по-видимому, именно с особенностями их питания. Сходные пищевые рационы сов обуславливают единство химического состава тканей двух рассмотренных нами видов (см. табл. 3а).

Закономерности накопления элементов у птиц разных трофических уровней изучены слабо. Исследования на юго-западе России не выявили существенных различий в накоплении многих элементов представителями разных трофических групп [8]. Описываемое явление в природных условиях осложняется не

только комплексом экологических факторов, формирующих состав пищевых рационов, но и химической формой элементов, поступающих в желудочно-кишечный тракт. Именно это обстоятельство в конечном счете определяет эффект увеличения либо уменьшения концентрации конкретного химического элемента при переходе к следующему трофическому уровню.

В нашем случае лишь содержание Pb и Mo в костной ткани сов достоверно превышало таковое тетеревиных. Обнаруженное нами уменьшение уровней Cd у хищных птиц по сравнению с фитофагами согласуется с данными ряда авторов о преимущественном накоплении этого элемента у растительноядных животных [17]. Различия между трофическими уровнями в концентрировании разных элементов также неодинаковы. При переходе на следующий трофический уровень содержание Ni и Pb меняется в 3–4 раза, а Cd и Mo – в 20 раз и более. Средние концентрации других элементов варьировали в значительно меньшей степени. Таким образом, поведение конкретных элементов в биогенном круговороте строго специфично.

Метод использования химических элементов в качестве маркеров географических популяций птиц внедрен в нашей стране Е. В. Добровольской [18] и Н. В. Лебедевой [5]. Сравнение собственных данных с концентрациями элементов у тетеревиных Кировской области [11] позволило выявить особенности химического состава птиц Урала. Содержание свинца в костях глухарей из сравняемого региона ($2,42 \pm 0,22$ мкг/г) оказалось значительно ниже, чем на Урале. Этот показатель у тетеревов и рябчиков в Кировской области (соответственно $2,47 \pm 0,29$ и $2,78 \pm 0,13$ мкг/г) был выше, чем в нашем регионе. Средний уровень свинца в костях глухаря на Урале выше уровня (5 мкг/г), свидетельствующего о повышенной токсической нагрузке на экосистему [19]. Отметим, что повышенные уровни свинца имели лишь 6 из 16 проанализированных нами особей. Средние уровни кадмия в костях уральских тетеревиных оказались намного ниже, чем в Кировской области, где они составляли ($1,15 \pm 0,14$ мкг/г – у глухарей, $0,98 \pm 0,15$ мкг/г у

тетеревов и $1,36 \pm 0,08$ – у рябчиков [11]. Содержание Ni и Cr в уральских тетеревиных в целом было ниже, чем в сравниваемом регионе, Mn, Fe и Zn – больше, а Cu – примерно столько же. Полученные результаты показывают специфичность химического состава особей из географически удаленных популяций.

Таким образом, спектр элементов в организме птиц конкретных регионов может быть использован как для выявления естественных и антропогенных биогеохимических аномалий, так и в качестве маркера географических популяций. Межвидовая специфика химического состава птиц определяется в основном их трофическими связями.

Авторы признательны всем, кто помог в сборе материала для анализа: О. В. Юланову, И. П. Гутаренко, Л. Н. Степанову, А. В. Лугаськову, И. Ф. Вурдовой, М. Г. Головатину, А. Л. Гаврилову, М. И. Брауде, А. Ю. Ендукину.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ-Урал № 04-04-96099 и № 04-04-96129.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. С. Безель, С. В. Мухачева, Материалы 5-го Всероссийского семинара "Популяция, сообщество, эволюция", Казань, 2002, 2, 32–49.
2. Е. В. Добровольская, *Успехи совр. биологии*, 2002, 122: 5, 489–494.
3. В. В. Ковальский, Труды Биогеохимической лаборатории, М., 1991, 22, 5–23.
4. Биоиндикация загрязнений наземных экосистем, М., 1988.
5. Н. В. Лебедева, Экотоксикология и биогеохимия географических популяций птиц, М., 1999.
6. K. Sawicka-Kapusta, J. Kozłowski, T. Sokolowska, *Environ. Pollut. (Ser. A)*, 1986, 42, 297–310.
7. N. E. I. Nyholm, *Archiwum ochrony środowiska*, 1995, 2, 83–89.
8. Н. В. Лебедева, *Экология*, 1997, 1, 45–50.
9. Н. В. Медведев, Птицы и млекопитающие Карелии как биоиндикаторы химических загрязнений, Петрозаводск, 1998.
10. T. Eeva, S. Tanhuanpää, C. Råbergh et al., *Functional Ecology*, 2000, 14, 235–243.
11. А. А. Сергеев, Тяжелые металлы в охотничьих птицах Кировской области (биологические, индикаторные и санитарно-гигиенические аспекты). Автореф. дис. ... канд биол. наук, Киров, 2003.
12. В. С. Безель, Е. А. Бельский, *Экология*, 2003, 1, 66–68.
13. Е. А. Бельский, В. С. Безель, Э. А. Поленц, Там же, 1995, 1, 46–52.

14. T. Eeva, E. Lehtikoinen, T. Pohjalainen, *Ecology*, 1997, **78**: 4, 1120-1131.
15. Н. В. Лебедева, И. А. Рябцев, Биоиндикация радиоактивных загрязнений, М., 1999, 72-85.
16. Р. Л. Потапов, Птицы СССР. Курообразные, журавлеобразные, Л., 1987, 7-260.
17. A. Frank, *Sci. Total Environ.*, 1986, **57**, 57-65.
18. E. V. Dobrovolskaya, Heritage of the Russian Arctic. Proceedings of the Int. Sci. W. Barents ... Symp., М., 1998, 343-347.
19. A. M. Scheuhammer, *Environ. Pollut.*, 1987, **46**: 2, 263-295.

Trace Element Composition of the Osteal Tissue of Tetraonidae and Strigiformes of the Urals

V. S. BEZEL, E. A. BELSKY, N. G. KURAMSHINA, L. N. MARTYNENKOVA

Accumulation of Pb, Ni, Cd, Mo, Fe, Mn, Zn, Cu, Cr and Hg in the bone tissue of Tetraonidae (*Tetrao urogallus*, *Lyrurus tetrix*, *Tetrastes bonasia*) and Strigiformes (*Strix nebulosa*, *S. uralensis*) collected in the Circumpolar, North, Middle and South Urals was analyzed. Species specificity in the levels of accumulation of Cr, Pb, Ni, Cd, Cd, Mo and Hg has been found. A discriminant analysis has made it possible to differentiate samples of 1) capercaillie and ptarmigan, 2) hazel hen, 3) owls. A comparison of element accumulation was carried out in two trophical groups: consumers of the 1st (Tetraonidae) and 2nd (owls) orders was carried out. Ni and Cd are accumulated at a higher rate in phytophagous birds, while Pb and Mo do so in predatory birds. The observed differences seem to reflect the specificity of food rations. A comparison of chemical composition of Tetraonidae of the Urals and of the Kirovsk oblast has been carried out.