

УДК 502.31:54+504.054:615.9

ТРОФИЧЕСКИЕ УРОВНИ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ: МУЛЬТИЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И ТОКСИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА

В. С. Безель, С. В. Мухачева

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
Россия, 620144, Екатеринбург, 8 Марта, 202
E-mail: bezel@ipae.uran.ru*

Поступила в редакцию 04.02.11 г.

Трофические уровни мелких млекопитающих: мультиэлементный состав и токсическая нагрузка. – Безель В. С., Мухачева С. В. – Проведен сравнительный анализ химического состава (25 элементов) рационов и организма (тушка) особей рыжей полёвки (*Clethrionomys glareolus*) и средней бурозубки (*Sorex caecutiens*) из симпатрических популяций, населяющих территории в зоне действия крупного медеплавильного комбината (Средний Урал). Показано, что в транслокации химических элементов по трофическим уровням млекопитающих особое положение занимает группа фитофагов. Специфика рациона и наличие барьера на уровне желудочно-кишечного тракта ограничивают накопление элементов в организмах животных. В этих же условиях плотоядные в сообществе млекопитающих играют роль концентраторов ряда химических элементов (Pb, Cd, Cr, As), содержание которых в организмах животных по сравнению с их уровнями в рационах возрастает. В то же время токсическая нагрузка на организм животных не зависит от трофической специализации.

Ключевые слова: техногенное загрязнение, химические элементы, мелкие млекопитающие, трофический уровень, токсическая нагрузка.

Trophic levels of small mammals: multielement composition and toxic load. – Bezel V. S. and Mukhacheva S. V. – A comparative study of the concentrations of 25 chemical elements in the diet and organisms (carcasses) of free-living individuals of bank vole (*Clethrionomys glareolus*) and Laxmann's shrew (*Sorex caecutiens*) from several areas in the vicinity of a copper smelting (Middle Ural) was carried out. The group of phytophages was shown to occupy a special position in the translocation of chemical elements by the trophic levels of mammals. The diet specificity and the presence of a barrier at the gastrointestinal path level limit accumulation of the elements in the animals' organisms. In the same conditions, the carnivorous in the mammal community play the role of concentrators of some chemical elements (Pb, Cd, Cr, and As) whose concentration increases in the bodies of animals in comparison with their levels in their diets. At the same time, the toxic loading upon the body of animals does not depend on trophic specialization.

Key words: technogenic pollution, chemical elements, small mammals, trophic level, toxic load.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно биосферной функции живого вещества следует говорить о нескольких уровнях биогенных циклов химических элементов, формируемых живыми организмами различной трофической принадлежности. Между этими уровнями в природных экосистемах имеет место своеобразный «геохимический отбор» микроэлементов (Гольдшмидт, 1938), обусловленный неодинаковой их биологической доступностью, формой соединений в почвах, спецификой зональных типов растительности, избирательностью процессов их поглощения и депонирования организмами различных трофических групп (Добровольский, 1983; Криволуцкий, 1983;

Покаржевский, 1985). Фактически имеет место сложный многоуровневый геохимический «портрет» целостного биогеоценоза и его возможная деформация в процессе антропогенной деятельности.

К настоящему времени накоплен обширный фактический материал по накоплению в отдельных компонентах природных экосистем радионуклидов (Покаржевский, 1985; Криволуцкий и др., 1989), макро- и микроэлементов, включая тяжелые металлы (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1986; Лебедева, 1999; Sawicka-Kapusta et al., 1986). Меньше работ посвящено миграции тяжелых металлов по пищевым цепям (Безель и др., 2004; Ma, 1987; Lindquist, Block, 1997; Hamers et al., 2006), в том числе в условиях химического загрязнения среды (Безель, 1987, 2006; Добровольский, 1988; Мухачева, Безель, 1995; Медведев, 1998; Безель и др., 2007, 2010; Nyholm, 1995; Notten et al., 2005; Bezel et al., 2007). Актуальность изучения микроэлементного состава популяций и сообществ различных групп биоты обусловлена необходимостью раскрытия механизмов формирования биогенных циклов и основанных на них методов регламентации антропогенного воздействия на окружающую среду.

Цель настоящей работы – исследовать распределение химических элементов в популяциях мелких млекопитающих, принадлежащих к различным таксономическим и трофическим группам, совместно обитающих на химически загрязненных и ненарушенных территориях.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы положены материалы, полученные в ходе исследований населения мелких млекопитающих (мышевидных грызунов и мелких насекомоядных) в зоне действия крупного предприятия медеплавильного производства и на незагрязненных (фоновых) территориях Среднего Урала.

Предприятие – Среднеуральский медеплавильный завод – действует длительный срок (с 1940 г.), зоны поражения вокруг него четко выражены. Подробное описание полигона исследований дано ранее (Воробейчик и др., 1994; Мухачева, 2007). В работе использованы данные, полученные в ходе безвозвратного изъятия зверьков в сентябре 2004 года (по окончании периода массового размножения). Отлов животных проводили одновременно на двух участках: импактном (в непосредственной близости от источника техногенной эмиссии, 1 – 2 км) и фоновом (в 30 км к западу от факела выбросов), на котором содержание приоритетных поллютантов в почвах не превышало кларковых уровней (Иванов, 1994).

В качестве модельных объектов выбраны два вида, принадлежащих к разным таксономическим и трофическим группам: это преимущественно растительноядная европейская рыжая полёвка (*Clethrionomys glareolus* Shreber, 1780) и насекомоядная средняя бурозубка (*Sorex caecutiens* Laxmann, 1788). Выбор объектов определялся доминирующим положением видов в составе сообществ мелких млекопитающих исследованных территорий. Специальными исследованиями (Мухачева, 2005) было показано, что концентрация основных поллютантов в рационах животных зависит от сезона отлова, в организме – от возраста и репродуктивного состояния (Мухачева, Безель, 1995). Поэтому в настоящей работе мы использовали

максимально близкие по срокам отлова (сентябрь 2004 г.) и функционально-возрастному состоянию (сеголетки в возрасте 3 – 4 месяцев) выборки животных.

Для оценки поступления различных элементов в организм мелких млекопитающих с кормом, на наш взгляд, наиболее оправдано определять концентрации элементов в содержимом желудочно-кишечного тракта, что позволяет учитывать специфику рациона изучаемых объектов (Мухачева, Безель, 1995). В камеральных условиях для последующего химического анализа отбирали тушки (без внутренних органов) и содержимое желудка. Образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 75°C до воздушно-сухой массы. Дальнейшую подготовку образцов и измерение их химического состава проводили по стандартным методикам (Baryshev et al., 1986; Koutzenogii et al., 2003). Элементный состав (25 элементов) рационов и тушек мелких млекопитающих (15 особей рыжей полёвки и 10 особей средней бурозубки) исследовали методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ВЭПП-3).

Для статистической обработки использовали логарифмированные значения концентраций элементов. Элементы, содержание которых в анализируемой пробе было ниже предела обнаружения данного метода, из анализа исключались. Количественные межгрупповые различия концентраций элементов у особей сравниваемых групп на разных территориях оценивали по *t*-критерию Стьюдента ($p < 0.05$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав рационов. Рыжая полёвка, будучи типичным фитофагом, использует в пищу широкий спектр видов лесных растений (Европейская..., 1981; Hansson, 1985). Основным кормом средней бурозубки являются насекомые (личинки, имаго) и паукообразные, прочие объекты (дождевые черви, моллюски, семена растений, амфибии и млекопитающие) поедаются ею в небольшом количестве (Докучаев, 1981; Ивантер, Макаров, 2001).

Основой трофической структуры любой системы, в том числе сообщества мелких млекопитающих, являются первичные продуценты. При определенном допущении можно полагать, что концентрации химических элементов в содержимом желудка фитофагов (рыжей полёвки) отражают уровни химических элементов в биомассе первичных продуцентов, а уровни элементов в содержимом желудка средней бурозубки будем рассматривать в качестве химического состава рационов плотоядных. Различный состав пищевых объектов фитофагов и плотоядных может обуславливать также отличие концентраций микроэлементов в организмах этих видов.

Сравнение фоновых рационов животных (в пределах одной трофической группы) с рационами животных импактных участков позволяет судить о степени химического загрязнения среды и его качественном составе. Установлено, что в кормовых объектах рыжей полёвки повышены концентрации таких элементов, как Fe и Cr (в 3.7 – 3.9 раза), Cu (5.4 раза), Zn (2.6 раза) и Pb (17.6 раза). Именно эти элементы следует рассматривать в качестве основных загрязнителей среды. В 4.4 раза увеличилась концентрация Br (табл. 1).

Таблица 1

Концентрация изученных элементов в рационе и тушках особой рыжей полёвки
из фоновой и импактной зон, мкг/г сухой массы

Элемент	Зона токсической нагрузки			
	Фоновая		Импактная	
	Рацион	Тушка	Рацион	Тушка
1	2	3	4	5
S	–	<u>18025.9^в</u> 16545.0–19639.4	–	<u>23419.0^г</u> 21556.2–25444.7
Cl	–	<u>2693.2</u> 2612.1–2776.9	–	<u>2525.0</u> 2753.2–2898.7
K	<u>24667.0^в</u> 19253.7–31605.3	<u>9697.6</u> 9367.6–10039.3	<u>16289.4^в</u> 13377.9–19834.6	<u>9927.9^г</u> 9744.5–10114.8
Ca	<u>5721.0^в</u> 4867.7–6723.9	<u>24886.2^в</u> 23457.5–26402.0	<u>2014.8^в</u> 1555.5–2609.8	<u>32246.0^г</u> 29814.4–34876.9
Ti	<u>29.03</u> 25.38–33.20	<u>3.5^в</u> 3.1–4.0	<u>59.3</u> 34.0–103.5	<u>2.4</u> 2.0–2.9
V	<u>0.4</u> 0.3–0.4	<u>0.09</u> 0.08–0.10	<u>0.35</u> 0.17–0.72	<u>0.08^г</u> 0.05–0.13
Cr	<u>139.4^в</u> 96.4–201.7	–	<u>537.4^в</u> 254.3–1136.0	–
Mn	<u>256.8</u> 226.5–291.1	<u>8.1</u> 7.4–8.8	<u>286.4</u> 212.3–386.5	<u>7.8</u> 6.7–9.1
Fe	<u>460.13</u> 399.73–529.67	<u>361.5^в</u> 336.1–388.8	<u>1715.6^в</u> 1215.4–2421.5	<u>298.8^г</u> 282.8–3156.8
Co	<u>0.16^в</u> 0.14–0.17	<u>0.09</u> 0.08–0.09	<u>0.57^в</u> 0.42–0.77	<u>0.08^г</u> 0.07–0.09
Ni	<u>20.5</u> 18.2–23.1	<u>1.82</u> 1.63–2.03	<u>21.79</u> 15.91–29.84	<u>2.35^г</u> 1.87–2.95
Cu	<u>19.7^в</u> 18.7–20.7	<u>5.9</u> 5.7–6.1	<u>105.5^в</u> 84.4–131.9	<u>7.4</u> 6.9–7.9
Zn	<u>110.2^в</u> 103.5–117.23	<u>90.3^в</u> 92.4–96.2	<u>291.4^в</u> 234.8–361.6	<u>94.8^г</u> 92.5–97.3
As	<u>0.2</u> 0.1–0.5	<u>1.4</u> 1.1–1.8	–	<u>0.5</u> 0.3–0.7
Br	<u>10.3^в</u> 9.1–11.7	<u>18.2</u> 16.9–19.6	<u>45.2^в</u> 27.4–74.6	<u>16.1</u> 14.6–17.7
Rb	<u>33.5^в</u> 25.3–44.4	<u>17.6^в</u> 16.5–18.8	<u>14.6^в</u> 12.5–17.2	<u>21.6^г</u> 20.4–22.8
Sr	<u>25.8^в</u> 21.3–31.3	<u>35.2</u> 33.4–37.1	<u>9.4^в</u> 5.6–15.9	<u>38.7^г</u> 35.7–41.9
Y	<u>1.9</u> 1.5–2.4	–	<u>2.1</u> 1.8–2.5	–
Zr	–	<u>0.6^в</u> 0.4–0.8	–	<u>1.8^г</u> 1.4–2.3
Mo	–	<u>0.2</u> 0.1–0.2	–	<u>2.3^г</u> 1.7–3.0
Cd	–	<u>0.5</u> 0.4–0.5	–	<u>2.2^г</u> 1.8–2.7
Sn	–	<u>0.2</u> 0.2–0.3	–	<u>0.7</u> 0.6–1.0
I	–	<u>0.19</u> 0.17–0.21	–	<u>0.85</u> 0.43–1.70

ТРОФИЧЕСКИЕ УРОВНИ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5
Ba	–	$\frac{28.8}{27.4-30.3}$	–	$\frac{31.5^r}{27.6-35.9}$
Pb	$\frac{21.8^a}{17.2-27.6}$	$\frac{1.7^b}{1.5-1.9}$	$\frac{382.9^a}{261.9-560.0}$	$\frac{8.5^r}{7.3-9.9}$
n, экз.	5	10	5	5

Примечание. В числителе – среднее геометрическое значение, в знаменателе – минимальное и максимальное значения, прочерк – концентрация в образце ниже предела обнаружения метода РФА СИ, а – достоверность различий концентраций химических элементов в рационах полёвок фоновых и импактных участков, б – достоверность различий концентраций химических элементов в рационах бурозубок фоновых и импактных участков, в – достоверность различий концентраций элементов в тушках полёвок и бурозубок фоновой территории, г – достоверность различий концентраций элементов у полёвок и бурозубок импактной территории. Достоверность различий на уровне $p = 0.05$.

В отличие от полёвок, рацион бурозубок на импактных участках менее обогащён Сг (в 1.8 раза), Cu (в 3.1 раза), Zn (в 1.4 раза) и Pb (в 3.8 раза). Концентрации остальных элементов в кормовых объектах бурозубок, населяющих загрязнённые территории, ниже, чем на фоновом участке (табл. 2). Таким образом, уже на этапе формирования рационов у плотоядных имеет место дискриминация большинства элементов-загрязнителей.

Таблица 2

Концентрация изученных элементов в рационе и тушке особей средней бурозубки из фоновой и импактной зон, мкг/г сухой массы

Элемент	Зона токсической нагрузки			
	Фоновая		Импактная	
	Рацион	Тушка	Рацион	Тушка
1	2	3	4	5
S	–	$\frac{39939.4^a}{32511.2-49064.7}$	–	$\frac{33398.6^r}{30649.5-36394.2}$
Cl	–	$\frac{3074.2}{2718.2-3476.8}$	–	$\frac{2624.8}{2326.1-2961.9}$
K	$\frac{13236.1^o}{4032.5-43445.5}$	$\frac{6068.8}{5355.5-6877.2}$	$\frac{7336.0^o}{6254.0-8605.2}$	$\frac{5955.1^r}{5213.4-6802.4}$
Ca	$\frac{5276.4}{1299.1-21431.1}$	$\frac{16957.5^a}{13910.4-20671.9}$	$\frac{2451.6}{1816.8-3308.2}$	$\frac{18236.5^r}{14456.0-23005.6}$
Ti	$\frac{204.1^o}{37.9-1100.7}$	$\frac{1.5^a}{0.9-2.6}$	$\frac{41.9^o}{32.0-54.8}$	$\frac{1.9}{1.2-3.0}$
V	$\frac{1.2^o}{0.2-6.3}$	$\frac{0.2}{0.1-0.3}$	$\frac{0.3^o}{0.2-0.3}$	$\frac{0.2^r}{0.1-0.3}$
Cr	$\frac{185.2}{30.3-1132.2}$	$\frac{0.6^a}{0.5-0.8}$	$\frac{340.8}{207.5-559.8}$	$\frac{1.4}{1.0-2.0}$
Mn	$\frac{244.8^o}{62.2-963.1}$	$\frac{8.4}{6.1-11.3}$	$\frac{129.3^o}{119.4-140.1}$	$\frac{9.7}{7.3-12.9}$
Fe	$\frac{2188.8}{526.8-9093.3}$	$\frac{115.3^a}{91.2-145.6}$	$\frac{1200.2}{1068.9-1347.6}$	$\frac{127.6^r}{114.7-142.0}$
Co	$\frac{0.60}{0.16-2.24}$	$\frac{0.05}{0.05-0.06}$	$\frac{0.37}{0.34-0.40}$	$\frac{0.05^r}{0.04-0.05}$
Ni	$\frac{10.3^o}{2.9-37.1}$	$\frac{0.9}{0.7-1.1}$	$\frac{6.0^o}{5.5-6.6}$	$\frac{0.7^r}{0.6-0.9}$

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5
Cu	<u>26.4</u> ⁶ 7.8–89.2	<u>6.2</u> ^a 5.6–6.8	<u>82.6</u> ⁶ 76.1–89.6	<u>8.6</u> 8.2–9.0
Zn	<u>252.0</u> 78.4–810.6	<u>262.4</u> ^a 206.9–332.8	<u>341.3</u> 310.4–375.2	<u>126.3</u> ^r 111.0–143.8
As	<u>1.0</u> 0.2–3.9	–	<u>1.0</u> 1.0	–
Br	<u>16.5</u> 5.4–50.9	<u>11.4</u> 10.0–12.9	<u>15.0</u> 13.1–17.1	<u>12.4</u> 10.5–14.7
Rb	<u>15.0</u> ⁶ 4.5–50.1	<u>9.8</u> ^a 7.8–12.2	<u>4.0</u> ⁶ 3.4–4.7	<u>5.7</u> ^r 5.1–6.5
Sr	<u>17.9</u> 4.4–72.5	<u>28.9</u> 24.5–34.3	<u>1.0</u> 1.0	<u>25.1</u> ^r 19.3–32.7
Y	<u>1.56</u> 0.4–5.7	<u>0.5</u> 0.4–0.5	<u>1.1</u> 0.8–1.4	<u>0.3</u> 0.1–0.6
Zr	–	<u>0.10</u> ^a 0.06–0.15	–	<u>0.07</u> ^r 0.04–0.14
Mo	–	<u>0.2</u> 0.2–0.3	–	<u>0.3</u> ^r 0.3–0.4
Cd	–	<u>0.3</u> 0.2–0.4	–	<u>0.6</u> ^r 0.5–0.8
Sn	–	<u>0.7</u> 0.3–1.4	–	<u>1.2</u> 0.9–1.4
I	–	<u>0.3</u> 0.2–0.5	–	<u>0.5</u> 0.4–0.6
Ba	–	<u>3.9</u> ^a 1.9–8.2	–	<u>7.6</u> ^r 5.8–10.0
Pb	<u>72.9</u> ⁶ 16.6–319.9	<u>5.4</u> ^a 4.6–6.4	<u>277.6</u> ⁶ 173.3–444.6	<u>65.5</u> ^r 5.8–115.6
n, экз.	5	6	4	4

Примечание. Условные обозначения см. табл. 1.

Концентрация элементов в организме мелких млекопитающих. Предположив, что содержание химических элементов в рационах фитофагов отражает преимущественно их концентрацию в растительных объектах (первичных продуцентах), можно оценить накопление или дискриминацию элементов на разных трофических уровнях млекопитающих при отсутствии загрязнения среды обитания (рис. 1, а). Концентрации химических элементов в тушках животных обеих групп практически совпадают. При этом в организмах фитофагов и плотоядных уровни накопления большинства рассмотренных нами элементов ниже, чем в рационах фитофагов (первичные продуценты). Исключение составляют Са, Zn и Br, которые содержатся в организмах полевок и бурозубок в повышенных по сравнению с фоновыми рационами полевок концентрациях.

При сравнении уровней накопления элементов в организме животных, обитающих на загрязненных участках с их концентрациям в «загрязненных» рационах полевок (первичные продуценты на импактном участке), видно, что и в этом случае наблюдается тенденция, сходная с отмеченной выше (рис. 1, б).

Таким образом, имеет место четкая дискриминация большинства химических элементов млекопитающими разных трофических уровней при разной степени

ТРОФИЧЕСКИЕ УРОВНИ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

загрязнения среды обитания. Наиболее ярко это демонстрирует Pb, минимальная концентрация которого зарегистрирована в тушках полевых. Исключение составляет Ca, высокие концентрации которого в организмах обоих видов обусловлены физиологической ролью этого элемента.

Интересно, что увеличение концентрации Pb в кормовых объектах полевых на импактной территории в 17 раз привело к лишь к 5-кратному росту его содержания в организме (см. табл. 1). В организмах же плотоядных повышение концентрации этого элемента в «загрязненных» рационах в 3.8 раза привело к увеличению его содержания в организме (тушке) бурозубок в 12 раз (см. табл. 2). Изменение концентраций других элементов в рационах насекомоядных с импактных участков (увеличение – для Cr, Cu, Zn, снижение – для Mn, Fe, Co, Ni) приводит либо их к незначительному накоплению в тушках (Cr, Cu), либо даже к снижению концентраций некоторых элементов – Zn, Mn, Fe, Co, Ni (см. табл. 2).

Рассмотрим общую картину распределения концентраций химических элементов-загрязнителей в цепочке: «рацион фитофагов (первичные продуценты) – организм фитофагов – рацион плотоядных – организм плотоядных (консументов)» для загрязненной территории (рис. 2). Можно заметить некоторую периодичность смены концентрации приоритетных загрязнителей (Cu, Zn, Pb): содержание элементов в рационах полёвок и бурозубок превышает

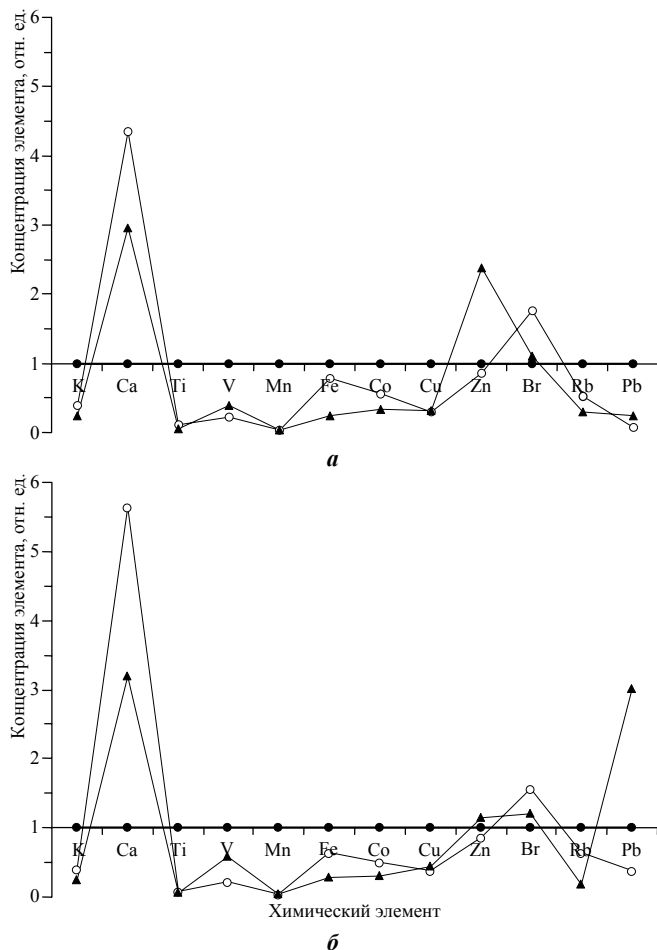


Рис. 1. Концентрация химических элементов в тушках животных разных трофических групп относительно рациона фитофагов на фоновой (а) и импактной (б) территориях: ○ – рыжая полёвка, ▲ – средняя бурозубка, ● – рацион рыжей полёвки

шает таковое в их организмах. Аналогичным образом ведут себя и другие элементы (например, Ti, Co). Подчеркнем, что речь идет о трофических уровнях, поскольку в нашем случае животных-фитофагов не следует рассматривать в качестве

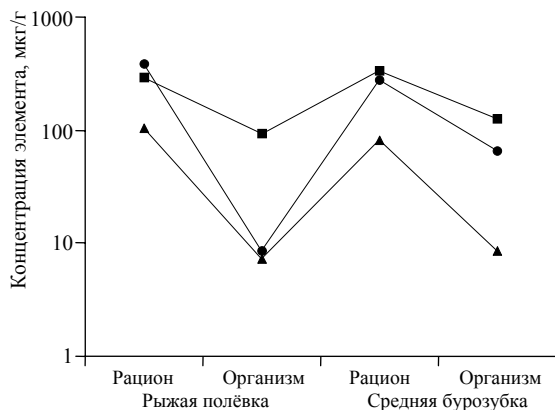


Рис. 2. Изменение концентраций приоритетных поллютантов (мкг/г сухой массы) по трофическим уровням млекопитающих: ▲ — Cu, ■ — Zn, ● — Pb

звена конкретной пищевой цепи, т.е. в качестве кормовых объектов бурозубок.

Известно, что основной зоной кормодобывания средней бурозубки является напочвенно-подстилочный слой (Ивантер, Макаров, 2001), а рацион состоит главным образом из паукообразных, напочвенных жесткокрылых (Carabidae, Elateridae, Staphylinidae), личинок двукрылых, клопов и дождевых червей. Согласно данным Е. Л. Воробейчика с соавторами (1994, 2007) в населении почвенной мезофауны импактной зоны

происходят кардинальные изменения в сравнении с фоновыми территориями. Одни группы здесь (Lumbricidae, Enchytraeidae, Diplopoda, Mollusca) выпадают полностью, другие (Carabidae, Staphylinidae, Arachnidae, Diptera) — резко уменьшают свою численность. Характерной чертой населения импактных участков является увеличение доли личинок шелконов (Elateridae) с 0.7 – 4.0 (на фоновом участке) до 35 – 50%, сопровождающееся ростом показателей обилия. При этом почвенные беспозвоночные перемещаются в подстилку. Так, если на фоновой территории в подстилке сосредоточено 10 – 30% от общей численности, то на удалении 1 – 2.5 км от факела выбросов этот показатель увеличивается до 50 – 80%.

Выполненный нами (Безель и др., 2004, 2010) анализ накопления основных загрязнителей у представителей разных групп беспозвоночных свидетельствует о наличии видовой специфики концентрирования изученных элементов. Именно этот сложный процесс формирования рационов плотоядных определяет концентрации элементов в содержимом желудков бурозубок, в том числе повышенное содержание в их кормовых объектах таких элементов, как Pb, Rb, Fe, Co (см. табл. 2).

Таким образом, в условиях химического загрязнения среды трофические уровни млекопитающих выступают в качестве своеобразных «геохимических барьеров», препятствуя активной передаче элементов-загрязнителей к высшим трофическим уровням экосистем.

Для оценки степени воздействия химического загрязнения на организм животных можно использовать такой интегральный показатель, как величина суммарной токсической нагрузки:

$$S_n = (1/n) \sum C_i / C_f,$$

где n – количество учитываемых элементов, C_i и C_f – концентрации элементов, которые могут рассматриваться как токсические на загрязненном и фоновом участках соответственно. Этот показатель может быть рассчитан как для условий поступления токсикантов с рационом (пищевая токсическая нагрузка), так и при накоплении элементов в тканях животных в качестве токсической нагрузки на организм (Мухачева, Безель, 1995; Безель и др., 2007).

Наши оценки показывают, что максимальной является нагрузка, формируемая химическими элементами в рационах фитофагов. Характерно, что эта высокая токсичность рациона полевок формируется широким спектром элементов Ti , V , Cr , Co , Cu , Zn , As , Cd , Pb (Безель и др., 2007). Подобная «кормовая нагрузка» у средней бурозубки примерно в 2 раза ниже и формируется она, главным образом, за счет Cu , Cd и Pb . В то же время токсическая нагрузка на организмы млекопитающих (рассчитанная для тушек) не зависела от трофической специализации животных (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в распределении химических элементов по трофическим уровням млекопитающих фитофаги занимают особое место. Специфика пищевых рационов этих видов и наличие барьера на уровне желудочно-кишечного тракта ограничивают поступление элементов от первичных продуцентов к организмам высших трофических уровней. В этих же условиях плотоядные играют роль концентраторов некоторых элементов (прежде всего, свинца), уровни накопления которых существенно возрастают в организмах животных в сравнении с их содержанием в кормовых объектах.

В условиях химического загрязнения среды суммарная токсическая нагрузка на организм консументов не зависела от трофической специфики изученных животных, а определялась в первую очередь принадлежностью к одному классу млекопитающих и сходством физиологических механизмов всасывания и депонирования изученных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 10-04-0146а), Программы развития ведущих научных школ (проект НШ-5325.2012.4) и Президиума УрО РАН (проект № 12-М-45-2072).

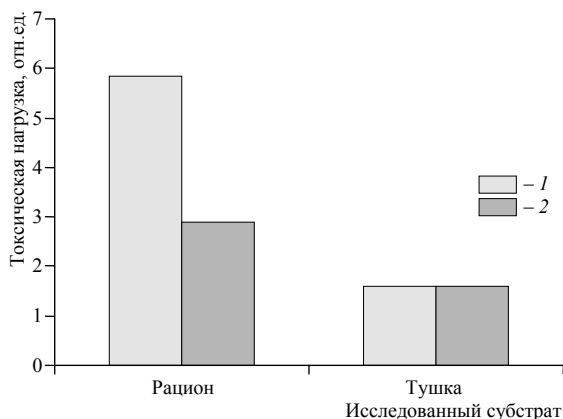


Рис. 3. Токсичность рационов и токсическая нагрузка на организм животных разных трофических групп на загрязненном участке: 1 – рыжая полёвка, 2 – средняя бурозубка

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безель В. С. Популяционная экотоксикология млекопитающих. М. : Наука, 1987. 129 с.
- Безель В. С. Экологическая токсикология : популяционный и биоценотический аспекты. Екатеринбург : Изд-во «Голицынский», 2006. 280 с.
- Безель В. С., Бельский Е. А., Ермаков А. И., Ракитина Л. В. Тяжелые металлы в трофических цепях лесных экосистем Урала // Урал. Радиация. Реабилитация. Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 2004. С. 315 – 339.
- Безель В. С., Бельская Е. А., Мухачева С. В., Куценогий К. П., Чанкина О. В. Химические элементы в системе трофических уровней наземных экосистем // Химия в интересах устойчивого развития. 2010. № 18. С. 129 – 137.
- Безель В. С., Куценогий К. П., Мухачева С. В., Савченко Т. И., Чанкина О. В. Элементный состав рационов питания и тканей мелких млекопитающих различных трофических уровней как биоиндикатор химического загрязнения окружающей среды // Химия в интересах устойчивого развития. 2007. № 15. С. 33 – 42.
- Воробейчик Е. Л., Ермаков А. И., Гребенников М. Е., Голованова Е. В., Кузнецов А. В., Пищулин П. Г. Реакция почвенной мезофауны на выбросы Среднеуральского медеплавильного комбината // Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель : материалы Междунар. науч. конф. Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. ун-та, 2007. С. 128 – 148.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург : УИФ «Наука», 1994. 280 с.
- Гольдшмидт В. М. Сборник статей по геохимии редких элементов. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1938. 243 с.
- Добровольский В. В. Геохимия микроэлементов. Глобальное рассеяние. М. : Мысль, 1983. 271 с.
- Добровольский В. В. Глобальные циклы миграции тяжелых металлов в биосфере // Тяжелые металлы в окружающей среде и охрана природы. М. : Изд-во МГУ, 1988. Т. 1. С. 4 – 13.
- Европейская рыжая полевка. М. : Наука. 1981, 352 с.
- Докучаев Н. Е. Питание землероек-бурозубок и оценка их роли в горно-таежных системах Северо-Восточной Сибири // Экология млекопитающих Северо-Восточной Сибири. М. : Наука, 1981. С. 3 – 22.
- Иванов В. В. Геохимическая экология элементов : справочник. М. : Недра, 1994. 305 с.
- Ивантер Э. В., Макаров А. М. Территориальная экология землероек-бурозубок (*Insectivora*, *Sorex*). Петрозаводск : Изд-во Петрозавод. гос. ун-та, 2001. 272 с.
- Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М. : Мир, 1986. 430 с.
- Кривоулицкий Д. А. Радиоэкология сообществ наземных животных. М. : Энергоатомиздат, 1983. 88 с.
- Кривоулицкий Д. А., Усачев В. Л., Рябцев И. А., Тарасов О. В. Миграция радионуклидов глобальных выпадений в трофических цепях биоценозов аридных зон // Журн. общ. биологии. 1989. Т. 50, № 5. С. 595 – 605.
- Лебедева Н. В. Экотоксикология и биогеохимия географических популяций птиц. М. : Наука, 1999. 199 с.
- Медведев Н. В. Птицы и млекопитающие Карелии как биоиндикаторы химических загрязнений. Петрозаводск : Изд-во Карел. НЦ РАН, 1998. 135 с.
- Мухачева С. В. Особенности питания рыжей полевки в условиях техногенного загрязнения среды обитания // Сиб. экол. журн. 2005. № 3. С. 523 – 533.
- Мухачева С. В. Особенности пространственно-временного размещения населения рыжей полевки в градиенте техногенного загрязнения среды обитания // Экология. 2007. № 3. С. 178 – 184.

Мухачева С. В., Безель В. С. Уровни токсических элементов и функциональная структура популяций мелких млекопитающих в условиях техногенного загрязнения // Экология. 1995. № 3. С. 237 – 240.

Покаржевский А. Д. Геохимическая экология наземных животных. М. : Наука, 1985. 298 с.

Baryshev V. B., Kulipanov G. N., Skrinisky A. N. Review of X-ray fluorescent analysis using synchrotron radiation // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipmen. 1986. Vol. 246, № 1 – 3. P. 739 – 750.

Bezel V. S., Koutchenogii K. P., Mukhacheva S. V., Savchenko T. I., Chankina O. V. Using of synchrotron radiation for study of multielemental composition of the small mammal diet and tissues // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Sec. A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipmen. 2007. Vol. 575, № 1 – 2. P. 218 – 220.

Hansson L. Clethrionomys food : generic, specific and regional characteristics // Ann. Zool. Fenn. 1985. Vol. 22, № 3. P. 315 – 318.

Hamers T., Van den Berg J. H. J., Van Gestel., Van Schooten F. J., Murk A. J. Risk assessment of metals and organic pollutants for herbivorous and carnivorous small mammal food chains in a polluted floodplain (Biesbosch, the Netherlands) // Environmental Pollution. 2006. Vol. 144, № 2. P. 581 – 595.

Koutzenogii K. P., Savchenko T. I., Chankina O. V., Kovalskaya G. A., Osipova L. P., Bgatov A. V. Synchrotron Radiation X-Ray Fluorescence Analysis (SRXRF) for Measuring the Multielement composition of samples of Biogenic Nature // J. Trace and Microprobe Techn. 2003. Vol. 21, № 2. P. 311 – 325.

Lindquist L., Block M. Influence of life history and sex on metal accumulation in two beetles species (Insecta: Coleoptera) // Bul. Environ. Contam. and Toxicol. 1997. Vol. 58, № 4. P. 518 – 522.

Ma W. C. Heavy metal accumulation in the mole, *Talpa europea*, and earthworms as an indicator of metal bioavailability in terrestrial environments // Bul. Envir. Contam. and Toxicol. 1987. Vol. 39. P. 933 – 938.

Nyholm N. I. Monitoring of terrestrial environmental metal pollution by means of free-living insectivorous birds // Annali di Chimica. 1995. Vol. 85. P. 343 – 351.

Notten M. J. M., Oosthoek A. J. P., Rozema J., Aerts R. Heavy metal concentrations in a soil-plant-snail food chain along a terrestrial soil pollution gradient // Environmental Pollution. 2005. Vol. 138, № 1. P. 178 – 190.

Sawicka-Kapusta K., Kozłowski J., Sokolowska T. Heavy metals in tits from polluted forests in southern Poland // Environmental Pollution. Ser. A. Ecological and Biological. 1986. Vol. 42, № 4. P. 297 – 310.