

УДК 502.31:54+504.054:615.9+599.323.43

В.С. Безель¹, С.В. Мухачева¹, К.П. Куценогий²,
Т.И. Савченко², О.В. Чанкина²

¹Институт экологии растений и животных УрО РАН,
Екатеринбург, 620144, ул. 8-го Марта, 202;

E-mail: bezel@ipae.uran.ru

²Институт химической кинетики и горения СО РАН,
Новосибирск, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 3;

E-mail: koutsen@ns.kinetics.nsc.ru

УЧАСТИЕ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В БИОГЕННЫХ ЦИКЛАХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

В настоящее время роль животных в биогенных циклах химических элементов изучена явно недостаточно [5, 9, 18, 20, и др.]. Это в полной мере относится к такому важному звену наземных экосистем, как популяции позвоночных, влияние которых на биогенный круговорот химических элементов сложно и многогранно [21; 23]. Можно говорить о следующих аспектах геохимической экологии позвоночных:

- *миграции химических элементов* в результате трофической деятельности животных (биогенная миграция), осуществляемой за счет преодоления биологических (поступление элементов из желудочно-кишечного тракта и их выведения из организма) и экологических (своеобразие рационов животных различных трофических уровней, усвоения и т.д.) барьеров;

- *накоплению химических элементов* в биомассе животных и последующей минерализации "животного опада";

- *литогенной миграции*, выраженной через интенсификацию биогенного обмена химических элементов в результате жизнедеятельности животных (увлажнение почвы, роющей деятельности, гнездостроительства и т.д.), способствующей стимуляции или угнетению фитоценозов и тем самым влияющей на включение химических элементов в биогенные циклы. Отметим сразу, что роль подобной литогенной миграции в общем биогенном обмене очень трудно поддается количественной оценке.

Химическое загрязнение среды не только увеличивает содержание токсических элементов в природных объектах, но и влияет (в силу антропогенной трансформации природных биогеоценозов и изменения качества местообитаний) на интенсивность и состав биогенных циклов. В результате изменяется исходное фоновое распределение химических элементов, которое отражает деформацию

биогенных потоков, контролируемых животными.

Типичные представители наземных позвоночных животных - мелкие млекопитающие - в силу их интенсивного метаболизма потребляют большое количество пищи. Потоки химических элементов через популяции этих животных являются основной формой их участия в круговороте веществ, реализуемого благодаря транзиту элементов в составе корма через их желудочно-кишечный тракт, а также за счет их депонирования в организмах животных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовали участие населения рыжей полевки в формировании транзитных потоков химических элементов в условиях загрязнения среды выбросами крупного медеплавильного комбината (Средний Урал). Пробные площади располагались на разном удалении от источника эмиссии: в непосредственной близости от медеплавильного комбината (1-2 км, далее по тексту импактная зона - *I*) и на условно чистой территории (20-30 км, фоновая зона - *F*). Подробное описание участков имеется в ранее опубликованных материалах [7; 16]. Выбор в качестве модельного объекта европейской рыжей полевки (*Clethrionomys glareolus*, Schreber 1780) обусловлен ее доминирующим положением в составе сообществ мелких млекопитающих на нарушенных и фоновых территориях.

Поступление химических элементов в организм животных оценивали на основании данных по их содержанию в кормовых объектах полевков. При сложном составе и пластичности рациона зверьков наиболее правильным, на наш взгляд, было определять концентрации элементов в содержимом их желудков [17]. Для этого у добытых особей вскрывали желудок и чистым шпательом отбирали содержимое. Депонирование элементов в организме животных оценивалось путем определения их кон-

центрации в тушках (без желудочно-кишечного тракта) полевков. Для последующего химического анализа образцы высушивали до абсолютносухой массы при $t + 75^{\circ}\text{C}$. В работе использованы данные о концентрациях 21 химического элемента (K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Nb, Mo, Cd, Sn, I, Ba, Pb) в рационе и тушках особей рыжей полевки, отловленных на импактной ($n = 11$) и фоновой ($n = 15$) территориях в 2004 г.

Для определения элементного состава биосубстратов (за исключением Cd) применяли метод рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа (ВЭПП-3) Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН [24]. Процесс приготовления образцов для анализа подробно описан в работе [26]. Образцы анализировались в виде таблеток диаметром 1 см, весом 30 мг и далее снимались при энергии возбуждения 21 keV. Для получения количественных данных по элементному составу биосубстратов применяли метод внешнего стандарта. Для этой цели использовали: российский стандарт злаковой травосмеси СОРМ1 ГСО 8242-2003, как наиболее близкий к определяемым образцам содержимого желудка и тканей зверьков, и для костной ткани BCR-32 (United Bureau of standards of European Economic Association). Концентрации кадмия в образцах определены методом атомной абсорбции на спектрометре AAS-6 Vario фирмы «Analytik Jena AG» с использованием электротермического варианта атомизации в лаборатории популяционной экотоксикологии ИЭРиЖ УрО РАН. Пробоподготовку проводили методом мокрой минерализации в концентрированной азотной кислоте с использованием микроволнового разложения.

Повышенные уровни химических элементов во внешней среде ведут к ее деградации и, как следствие, к снижению численности животных. В естественных условиях подзоны южной тайги обилие некоторых видов мелких млекопитающих в разные годы может различаться в десятки раз [12], соответственно изменяется и интенсивность контролируемого ими биогенного обмена химических элементов. Численность зверьков в бесснежный период оценивали в течение 1990-1998 гг. на основании данных регулярных отловов животных (май, июль, сентябрь) стандартным методом ловушко-линий с использованием давилок. Отработано около 40 тыс. ловушко-суток, отловлено более 1400 особей рыжей полевки. Абсолютную численность зверьков рассчиты-

вали по методике А.Д. Бернштейн с соавторами [6].

Для расчетов некоторых показателей (суточное потребление корма, поступление элементов в организм с рационом, оценки биомассы) использовали данные для условной "среднестатистической особи", обитающей на определенной территории. Для этого использовали сведения о демографической структуре населения рыжей полевки в импактной и фоновой зонах, а также размерно-весовых характеристиках зверьков [13].

Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных программ Microsoft EXCEL 6.0. Достоверность различий концентраций элементов у особей сравниваемых групп на разных территориях оценивали с использованием t -критерия Стьюдента для их среднегеометрических значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Транзитные потоки химических элементов через популяции мелких млекопитающих

По мнению ряда авторов существенных различий в рационах рыжих полевков, принадлежащих к различным половозрастным группам, не найдено, в то же время хорошо выражены сезонные и биотопические изменения спектра питания [4; 25 и др.]. Специальными исследованиями [15, 19] было показано, что содержание приоритетных поллютантов в рационах зверьков существенно варьирует в зависимости от сезона отлова. Если на фоновом участке концентрации изученных элементов в содержимом желудка остаются практически неизменными на протяжении всего бесснежного периода, отражая постоянство микроэлементного состава фоновой растительности, то на загрязненных участках регистрируются сезонные изменения элементного состава рациона: в весенний период (апрель-май) отмечены максимальные концентрации элементов с последующим снижением к осени. В ходе анализа была показана возможность объединения выборки зверьков разного возраста и пола, добытых на одних пробных площадях в течение определенного сезона [19].

Результаты анализа элементного состава кормовых объектов особей рыжей полевки, отловленных в градиенте техногенного загрязнения среды, приводятся в таблице 1. Поскольку данные адекватно описываются логнормальным распределением, то достоверность различий концентраций (их среднегеометрических значений) оценивали по t -критерию Стьюдента.

Таблица 1. Содержание химических элементов в рационе и их суточное поступление с кормом в организм особей рыжей полевки, отловленных на фоновой и импактной территориях

Элемент	Концентрации химических элементов в кормовых объектах, мкг/г						Поступление элементов в организм с кормом, ** мкг/особь. сут.	
	Фон			Импакт			Фон	Импакт
	$\langle x_i \rangle$	$\sigma_{\text{ж}}$	n_i	$\langle x_i \rangle$	$\sigma_{\text{ж}}$	n_i		
K	25000	1,5	4	16300	1,5	5	80779	53458
*Ca	5700	1,3	4	2000	1,7	5	17896	6950
Ti	29	1,3	4	59	3,0	5	89.8	315.6
V	0,4	1,2	4	0,4	4,3	5	1.14	2.4
Cr	140	1,9	4	537	4,5	5	526.3	3376.2
Mn	260	1,2	4	286	1,8	5	791.9	1016.6
*Fe	460	1,3	4	1720	2,0	5	1426.4	6601.1
*Co	0,2	1,2	4	0,6	1,8	5	0.5	2.1
Ni	20	1,2	4	22	1,9	5	63.1	78.3
*Cu	20	1,1	4	105	1,6	5	59.5	355.1
*Zn	110	1,1	4	260	1,5	5	333.5	960.0
*As	0,2	4,4	4	2,8	1,1	5	1.3	8.7
Br	10	1,2	4	45	2,7	5	31.7	258.7
Rb	34	1,6	4	15	1,4	5	111.4	46.8
Sr	26	1,4	4	9	2,8	5	82.5	41.3
Y	1,9	1,5	4	2,1	1,4	5	6.1	6.8
*Pb	22	1,6	4	380	2,1	5	71.4	931.8
*Cd	1,7			6,3		5	5.1	19.1

$\langle x_i \rangle$ - среднее геометрическое значение концентрации; $\sigma_{\text{ж}}$ - стандартное отклонение среднего геометрического; n_i - число измерений, по которому проведено усреднение; *статистически достоверные ($p < 0.05$) различия между значениями показателей в градиенте техногенного загрязнения среды; **в расчете на "условную" особь.

Количество химических элементов, поступающих в желудочно-кишечный тракт животных, определяется не только их концентрацией в рационе, но и общим объемом потребляемого корма. Литературные данные свидетельствуют о том, что суточное потребление смешанного корма взрослыми особями рыжей полевки зависит от массы зверьков и составляет 5-7 г [10, 11]. Используя результаты собственных исследований [15] мы оценили суточное потребление корма полевками разных функционально-возрастных групп (табл. 2). Поскольку различия в потреблении корма зверьками разного пола, возраста и репродуктивного статуса достигают 30% и более, то при расчетах общего количества химических элементов, вовлекаемых в биогенный обмен, на наш взгляд необходимо учитывать демографическую структуру популяции. Выполненные расчеты показали, что в среднем одна "условная" особь потребляет около 3 г корма (в пересчете

на сухой вес) в сутки (табл. 2). Концентрации элементов в рационе и рассчитанный нами объем корма, потребляемого такой полевкой, позволяет оценить количество химических элементов, ежедневно поступающих в организм зверьков, обитающих на загрязненных и "чистых" участках (табл. 1).

На рис. 1 представлены данные об изменении суточного поступления химических элементов в организм особей рыжей полевки, населяющих фоновые и импактные участки. Для удобства данные представлены в относительных единицах. Концентрация каждого из элементов, поступающих с кормом в организм полевок, населяющих фоновый участок, была принята за единицу. Тогда уровни поступления элементов в организм животных, отловленных в окрестностях медеплавильного комбината, выраженные в относительных единицах, будут свидетельствовать о кратности их изменения в сравнении с фоновыми значениями.

Таблица 2. Примерное среднесуточное потребление корма (в расчете на сухую массу, в г) особями рыжей полевки разных демографических групп, населяющими фоновые и импактные территории [15]

Пол животных	Функционально-возрастная группа	Исследованная территория	
		фоновая	импактная
Самцы	неполовозрелые сеголетки	2.80	2.76
	половозрелые сеголетки	3.05	2.96
	перезимовавшие особи	3.48	3.30
Самки	неполовозрелые сеголетки	2.77	2.76
	половозрелые сеголетки	3.26	3.12
	перезимовавшие особи	3.68	3.48
«Условная» особь*		3.01	3.04

*данные рассчитаны с учетом демографической структуры популяции

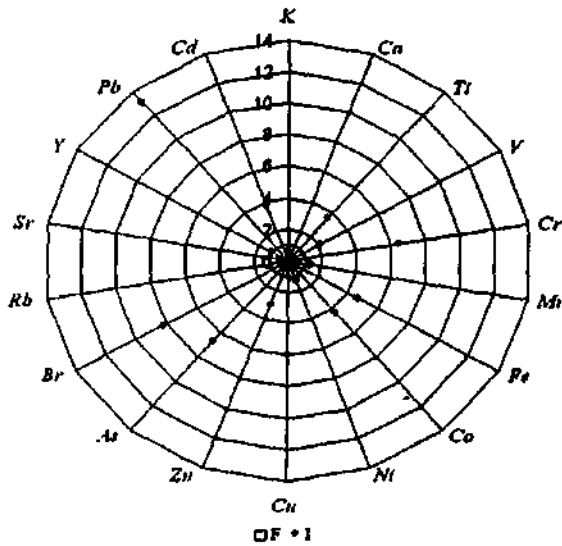


Рис. 1 Суточное поступление с кормом химических элементов (в отн. ед.) в организм одной особи рыжей полевки, населяющих фоновые (F) и импактные (I) территории

На загрязненном участке поступление в желудочно-кишечный тракт большинства химических элементов возрастает: концентрация *Zn*, *V*, *Ti* – увеличивается в 2-3 раза, *Fe*, *Cr*, *Cd* – в 4 раза, *Cu*, – в 5 раз. Максимально возрастает поступление *Br* и *Pb*. В то же время, концентрации ряда элементов (*Rb*, *Sr*, *Ca*, *K*) снижаются, а уровень *Mn*, *Ni*, *Y* практически не меняется.

С точки зрения стабильности биогенных циклов в природных биоценозах важным является не столько потребление химических элементов отдельной особью, сколько интегральные потоки через популяции организмов конкретного вида.

В ходе многолетних наблюдений за сообществами мелких млекопитающих, насе-

ляющими импактные и фоновые участки, нами накоплены данные об относительной численности животных разных видов и ее динамике. Использование методики, предложенной А.Д. Бернштейн с соавт. [6], позволило перевести данные по относительной численности зверьков в абсолютные показатели. Результаты расчетов приведены в таблице 3. Согласно этим данным плотность населения полевков на фоновой территории изменяется в зависимости от фазы популяционного цикла в 16 и более раз, в импактной зоне амплитуда колебаний не превышает 10-кратной отметки. В то же время, в пределах одной фазы цикла диапазон изменений абсолютной численности зверьков составлял 1.3-3.3 раза.

Таблица 3. Плотность населения рыжей полевки (особей/га) на фоновой и импактной территориях. Средний Урал, 1990-1998 гг.

Годы наблюдений	Участок исследований	
	фоновый	импактный
1990	3.4	4.9
1991	15.6	9.1
1992	23.5	8.2
1993	4.0	5.2
1994	7.7	4.3
1995	36.5	16.4
1996	2.2	1.7
1997	12.0	4.2
1998	15.9	4.8

Используя данные о плотности населения и суточном поступлении элементов в организм рыжих полевок вблизи источника эмиссии и на фоновой территории можно оценить интегральное количество химических элементов, поступающих в организм всех животных популяции этого вида. На рис. 2 представлена многолетняя динамика суточного поступления наиболее значимых химических элементов в популяции рыжих полевок, обитающих на фоновых участках (А) и в окрестностях медеплавильного комбината (Б).

Естественно, что при неизменном уровне химических элементов в окружающей

среде на всех участках годовая изменчивость их транзита через популяции полевок определяется динамикой численности зверьков. На загрязненной территории транзит через популяцию таких элементов как Fe, Co, Cd возрос по сравнению с фоновыми участками примерно в 2 раза, Zn - в 1.4 раза, Cu - почти в 3 раза (рис. 3). Максимально (в 6 раз) увеличился поток Pb. Вместе с тем количество Ca, вовлекаемое в обмен популяцией рыжей полевки на импактном участке, снизилось более чем в 5 раз по сравнению с фоновыми значениями.

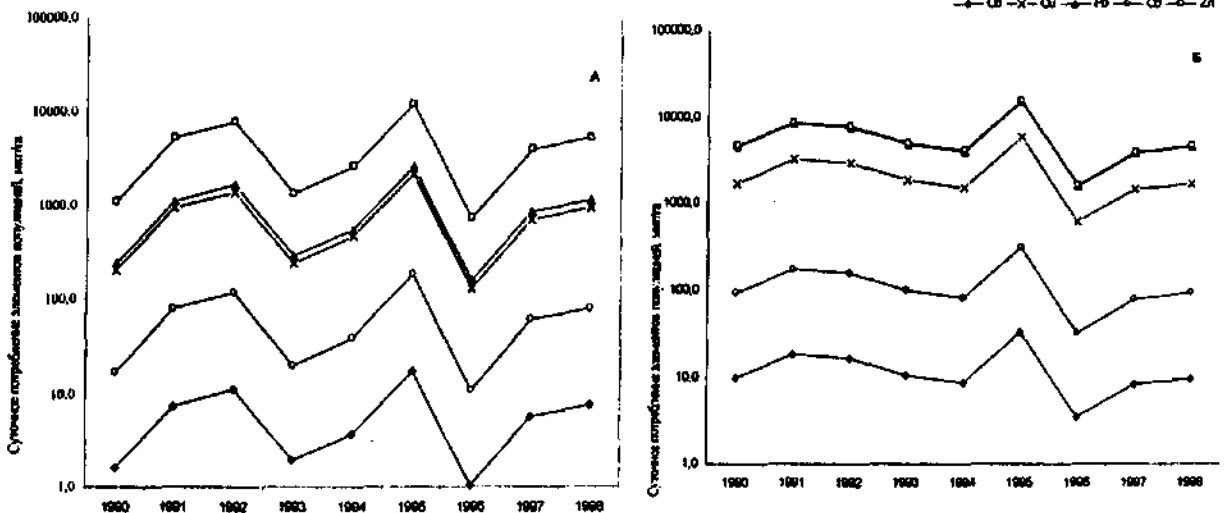
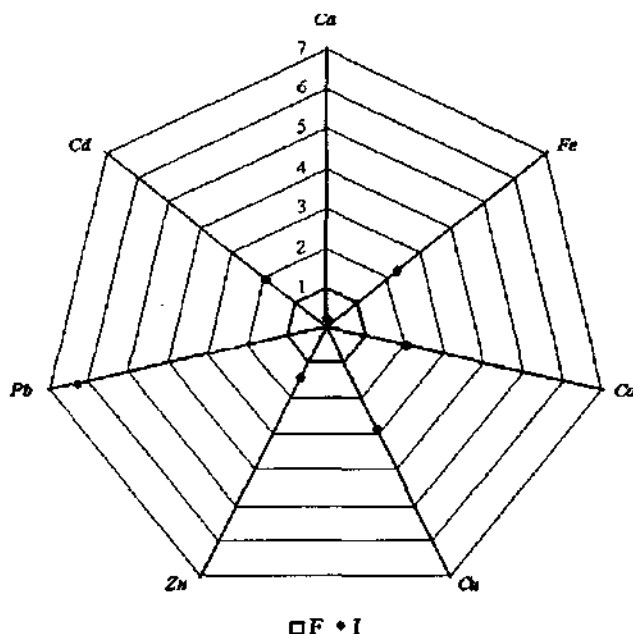


Рис. 2. Многолетняя динамика суточного потребления химических элементов с кормом (мкг/га) в популяциях рыжей полевки, населяющих фоновую (А) и импактную (Б) территории



3

Рис. 3. Динамика поступления основных химических элементов (в отн. ед.), в популяции рыжей полевки на фоновой территории (F) и в окрестностях медеплавильного комбината (I)

Накопление химических элементов в организмах мелких млекопитающих

Вторым фактором, влияющим на участие млекопитающих в биогенных циклах, является накопление химических элементов в организме с последующей минерализацией «животного опада». В случае таких животных, как мелкие млекопитающие, продолжительность жизни которых составляет около года, речь идет о ежегодном обмене химических элементов в результате разложения или перехода их с биомассой на следующий трофический уровень.

В таблице 4 представлены результаты анализа концентраций химических элементов в тушках рыжих полевок, отловленных на чистых и загрязненных участках. В многочисленных исследованиях показано, что повышенные уровни химических элементов в среде обитания (и в рационах) неизбежно ведут к увеличению их концентраций в организмах животных. Увеличение концентрации элементов в организмах полевок, отловленных на импактных участках, отмечено лишь для таких важ-

нейших токсикантов как Pb и Cd (примерно в 5 раз), а также Zr и Sn – в 3 раза. На основании информации, находящейся в нашем распоряжении, мы не можем объяснить существенное (в 4.5 раза) увеличение концентрации I в тушках полевок из загрязненной зоны. Различия в концентрациях остальных элементов несущественны (рис.4).

Для оценки общего количества химических элементов, содержащихся в популяции мелких млекопитающих, кроме приводимых выше данных по динамике численности зверьков, необходимо знать массу отдельных особей, которая зависит от пола, возраста и репродуктивного статуса животного. Данные, полученные нами ранее в ходе многолетнего обследования размерно-весовых характеристик добытых зверьков [13], позволили рассчитать массу "условной" особи (с учетом специфики демографической структуры популяции). Оказалось, что масса такой особи на фоновой территории составила 19.8 г, в окрестностях медеплавильного комбината – 20.4 г.

Таблица 4. Концентрация химических элементов (мкг/г сухой массы) в тушках рыжих полевок, населяющих фоновые и импактные территории

Элемент	Концентрация элемента, мкг/г					
	Исследованная территория					
	фоновая			импактная		
	$\langle x_i \rangle$	$\sigma_{\text{ст}}$	n_i	$\langle x_i \rangle$	$\sigma_{\text{ст}}$	n_i
*S	18000	1,3	10	24000	1,2	5
Cl	2700	1,1	10	2800	1,1	5
K	9700	1,1	10	9900	1,0	5
*Ca	25000	1,2	10	32000	1,2	5
*Ti	3,5	1,5	10	2,4	1,5	5
V	0,1	1,4	10	0,1	2,6	5
Mn	8	1,3	10	8	1,4	5
*Fe	360	1,3	10	300	1,1	5
Co	0,1	1,2	10	0,1	1,4	5
Ni	1,8	1,4	10	2,3	1,6	5
*Cu	6	1,1	10	7	1,1	5
Zn	94	1,1	10	95	1,1	5
*As	1,4	2,2	7	0,5	2,0	5
Br	18	1,3	10	16	1,2	5
*Rb	18	1,2	10	22	1,1	5
Sr	35	1,2	10	40	1,2	5
*Zr	0,6	3,0	9	1,8	1,7	5
Nb	3	3,6	10	2,2	1,8	5
*Mo	0,2	1,8	10	0,3	1,1	5
*Cd	0,5	1,4	9	2,2	1,4	4
*Sn	0,2	2,1	9	0,7	1,6	4
*I	(0,2)	1,4	9	(0,9)	3,3	4
Ba	29	1,2	9	30	1,3	4
*Pb	1,7	1,5	10	(8)	1,4	5

$\langle x_i \rangle$ - среднее геометрическое значение концентрации;
 $\sigma_{\text{ст}}$ - стандартное отклонение среднего геометрического;
 n_i - число измерений, по которому проведено усреднение;
*статистически достоверные ($p < 0.05$) различия между значениями показателей в градиенте техногенного загрязнения среды

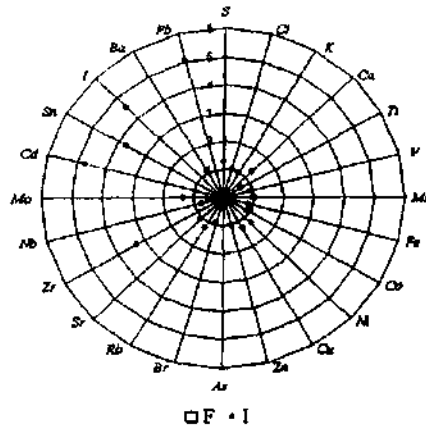


Рис. 4. Изменение концентрации химических элементов (отн. ед.) в тушках рыжих полевок, населяющих фоновую территорию (F) и в окрестностях медеплавильного комбината (I)

Полученные данные позволяют оценить общее количество рассмотренных нами химических элементов, содержащихся в популяциях рыжих полевок на фоновом и импактном участках (рис. 5). Следует подчеркнуть, что годовые колебания уровней накопления всех рассмотренных элементов в популяциях четко отражают многолетнюю динамику численности зверьков. При этом если оперировать средними за весь период наблюдений данными

ми, то некоторые из элементов (*Cu*, *Ca*, *Mn*, *Ti*, *Ni*) на фоновой территории вовлекаются в биомассу природных популяций примерно в 1.5–3.0 раза интенсивней, чем на импактных участках. Концентрации других элементов (*Pb*, *Cd*) в биомассе населения рыжей полевки на загрязненной территории более чем в 2 раза, а *Zr* и *Sn* - в 1.5 раза превышают таковые в фоновой популяции (рис. 5).

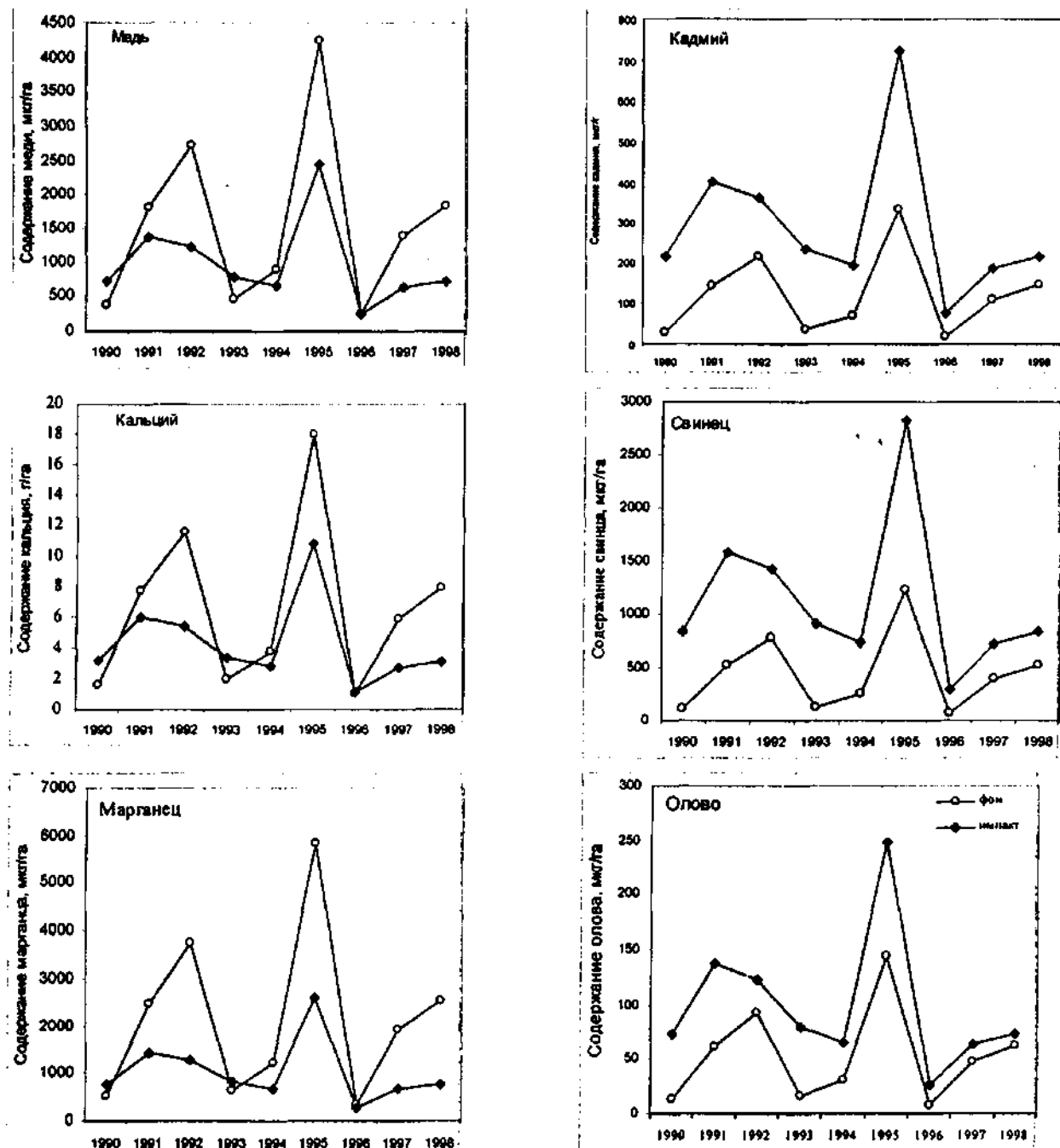


Рис. 5. Многолетняя динамика содержания химических элементов в биомассе полевок на фоновой и импактной территориях

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно современным представлениям биота формирует и контролирует в биосфере потоки вещества и энергии, обеспечивая постоянство параметров окружающей среды (Вернадский, 1965, 1967). Организмы, находящиеся на различных трофических уровнях, активно участвуют в стабилизации экосистем, выступая как в роли геохимических барьеров, так и в качестве природных депо химических элементов.

Если биогенные циклы, имеющие постоянную интенсивность в естественных, не измененных антропогенной деятельностью биогеоценозах (БГЦ), следует рассматривать в качестве фактора, обеспечивающего их стабильное функционирование, то деформация этих циклов при химическом загрязнении среды – проявление дестабилизирующих процессов.

Участие животных в формировании биогенных циклов, в конечном счете, определяется не столько уровнем химического загрязнения среды (прежде всего их рационов) и, как следствие, особенностями накопления химических элементов в организмах различного вида, сколько составом сообщества, обилием и массой его компонентов.

Данные о роли позвоночных в биогенных циклах химических элементов немногочисленны и противоречивы. По данным Б.Д. Абатурова [1], млекопитающие в лесных экосистемах могут использовать до 10% доступной им биомассы надземных частей растений. Аналогичные оценки приводят [8], согласно которым популяция мелких млекопитающих при биомассе 780 г/га поглощает с пищей 17 г/га кальция, 2 – Fe и 3 – Mn. В луговых экосистемах по данным тех же авторов полевки при высокой плотности в 100 экз./га возвращают с экскрементами за вегетативный сезон до 0.1 максимальной массы всех микроэлементов. По мнению других авторов, например [20], приводимые выше оценки завышены.

С точки зрения минерального обмена известно, что из общего количества потребляемых животными-фитофагами минеральных веществ с калом выводится около 60%, с мочой – 40% [22]. С другой стороны, влияние млекопитающих на биогенный круговорот химических элементов не ограничивается объемом изъятия наземной биомассы. Речь идет о предварительной ферментативной обработке в желудочно-кишечном тракте животных-фитофагов части первичной продукции наземных экосистем. При достаточном увлажнении

неперевариваемые остатки пищи разлагаются быстрее, чем ненарушенный растительный материал. Участие сапрофильного комплекса ведет к ускоренной минерализации экскрементов и замыканию биогенного цикла химических элементов, ускоряется освобождение элементов питания растений, что ведет к интенсификации круговорота веществ в экосистемах [2]. Таким образом, млекопитающие-фитофаги, играя активную роль в ускоренном разложении и минерализации растительного органического вещества, выступают в качестве первичных редуцентов. К сожалению, сведения по изменению биогенного обмена зольных элементов в условиях химического загрязнения среды в литературе практически отсутствуют.

Химические элементы, депонированные в биомассе животных-фитофагов, включаются в биогенные циклы преимущественно в результате транслокации на следующий трофический уровень с последующей минерализацией экскрементов. Выше рассмотрено участие модельного вида млекопитающих (рыжая полевка) в формировании двух биогенных циклов: транзит химических элементов через желудочно-кишечный тракт и их накопление в биомассе животных.

Приводимые выше данные показывают наличие четкой корреляции между рассмотренным участием мелких млекопитающих в биогенном обмене и динамикой их численности (см. рис. 2 и 5). Это обстоятельство свидетельствует о том, что, кроме прямого влияния на биогенные процессы уровня загрязнения среды, значительную роль играет вызванная им деградация местообитаний, непосредственно влияющая на обилие животных на данном участке. На фазе депрессии численности (1990, 1993, и 1996 гг.) различия в концентрациях элементов, депонированных в биомассе зверьков на фоновой и импактной территориях, минимальны (рис. 5). По этой же причине максимальные различия зарегистрированы для этих показателей на фазе пика численности (1992, 1995, 1998 г.г.).

Если полагать, что элементный состав рационов полевок в течение года изменяется незначительно, то общее количество химических элементов, проходящих с пищей через их популяции, в среднем за весь период наблюдений может достигать на фоновых участках следующих значений: Ca – свыше 90 г/га, Fe – 7 г/га, Zn – около 2 г/га за год. В этих условиях транзит Pb не превышает 400 мг/га в год. Следует отметить, что в год максимальной численности зверьков (36.5 особей/га) транзит Ca

через популяцию за год может достигать 250 г/га, Pb – 1 г/га.

Естественно, что на загрязненном участке концентрации основных металлов в рационах, прежде всего токсических элементов (Pb и Cd), повышены (табл.1). Однако не всегда повышенный уровень элемента в кормовых объектах животных ведет к возрастанию общего потока этого элемента через популяцию в целом. Дело в том, что интегральный поток определяется еще и численностью зверьков. Вызванное химической деградацией среды снижение общего обилия животных на загрязненном участке может оказывать большее влияние на интенсивность вовлечения химических элементов в биогенную трансформацию, чем это следует из факта повышенных их концентраций в рационах животных. Это иллюстрируют данные рис. 3, согласно которым на импактном участке наблюдается повышенное поступление с рационом Pb, Cd, Zn и Cu. В то же время транзит Ca резко снижается. Например, в год пика численности полевых на импактном участке (16.3 особи/га) через их популяцию проходит до 6 г/га в год Pb и Zn, Cu – 2 г/га и Cd – 100 мг/га.

Участие в биогенном обмене химических элементов, накапливаемых популяцией мелких млекопитающих, определяется сочетанием тех же факторов - накоплением в организмах животных и динамикой их численности на загрязненном и фоновом участках. Общее количество таких элементов как, Ti, Ca, Cu, Mn, Ni, депонируемых в биомассе зверьков на фоновой территории больше, чем их количество на импактном участке. Обратная тенденция имеет место при накоплении Pb, Cd, Sn, Zr (рис. 5). Подобное различие объясняется тем, что в первом случае повышенные уровни элементов в биомассе на импактном участке не компенсируются более высокой плотностью зверьков на фоновой. Накопление других элементов в зоне действия медеплавильного комбината в биомассе столь велико, что даже пониженная численность зверьков на этом участке не может снизить большое количество этих элементов в биомассе полевых. По нашим оценкам необходимо примерно шестикратное превышение концентраций элементов в организмах зверьков, чтобы общее их накопление в популяционной биомассе даже при сниженной их численности на импактной территории превышало таковое на фоновой.

Поскольку мы рассмотрели популяции короткоцикловых животных, продолжительность жизни которых не превышает года, то

имеет смысл сравнить общий годовой транзит химических элементов через желудочно-кишечный тракт зверьков с накоплением тех же элементов в популяционной биомассе. Наши оценки показывают, что транзит некоторых элементов (Ni, Mn) через организмы зверьков превышает их содержание в биомассе. Для Pb зарегистрировано превышение уровня на фоновой территории в 2 раза, на импактной – в 5 раз. Другие элементы (As, Zn, Cd) в большем количестве содержатся в биомассе зверьков, чем их поступает с кормом. Это превышение особенно выражено в случае Ca: его содержание в биомассе зверьков на фоновом участке в 30 раз больше, чем прохождение этого элемента через желудочно-кишечный тракт. На загрязненном участке эти различия достигают 90-кратной величины.

Связь между поступлением химических элементов с рационом и их депонированием в организмах зверьков можно иллюстрировать, сравнивая соответствующие кратности увеличения концентрации в организмах зверьков с их содержанием в кормовых объектах (рис.6). Биссектриса на рисунке соответствует прямой пропорциональности содержания элемента в рационе и в организме животных. Все рассмотренные нами элементы расположены ниже этой линии. Это значит, что в организмах полевых имеют место процессы дискриминации (прежде всего на уровне стенки желудочно-кишечного тракта), которые ограничивают поступление элементов во внутренние среды организма. По нашим данным лишь Cd способен накапливаться в избыточных количествах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание химических элементов в кормовых объектах и организмах рыжих полевых можно рассматривать в качестве показателей участия популяций мелких млекопитающих в формировании биогенных циклов элементов в условиях фоновых и химически загрязненных участков. Интенсивность такого биогенного обмена и его антропогенная трансформация определяется процессами прямого депонирования элементов в объектах внешней среды (рационах) и популяционными механизмами. В числе последних имеются в виду как эколого-видовая специфика рационов, так и механизмы, контролирующие численность зверьков. Химическая деградация стадий обитания животных ведет к существенной модификацией их динамики численности, что прямо влияет на интенсивность вовлечения элементов в биогенный обмен.

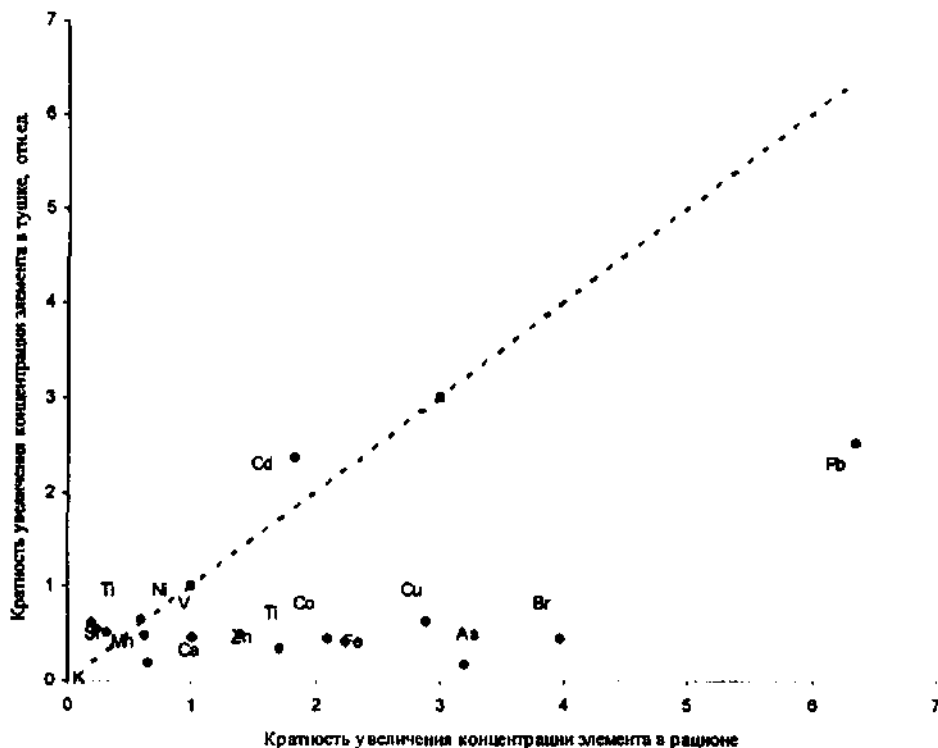


Рис. 6. Зависимость концентрации химических элементов в организме полевок от уровней накопления в кормовых объектах животных

Полученные данные подчеркивают наличие двух механизмов, контролирующих участие животных в биогенном обмене химических элементов:

1. их накопление в рационах и тканях, прямо связанное с уровнем загрязнения среды;
2. состояние местообитаний и их деградация при химическом загрязнении. В последнем случае речь идет о смене состава рационов и изменении условий обитания зверьков, ведущее к коррекции динамики их численности.

Обсуждаемые выше результаты позволяют говорить об особой барьерной роли популяций мелких млекопитающих-фитофагов в общем транзите химических элементов по трофическим уровням техногенно загрязненных наземных экосистем, препятствующей поступлению токсических элементов к плотоядным животным.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 07-04-00075-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Абатуров Б.Д. Биопродукционный процесс в наземных экосистемах. Москва: Наука, 1979, 128 с.
2. Абатуров Б.Д., Млекопитающие как компонент экосистем. Москва: Наука, 1984, 285 с.
3. Абатуров Б.Д., Кузнецов Г.В. Изучение интенсивности потребления пищи грызунами // Зоол. журн., 1976. Т.55. № 1. С. 122-127.
4. Европейская рыжая полевка. Москва: Наука, 1981. 352 с.
5. Безель В.С., Мухачева С.В. Мелкие млекопитающие в биогеохимических циклах химических элементов // 5 Всерос. популяц. семинар: Популяция, сообщество, эволюция. Казань, 2001. С. 32-49.
6. Бернштейн А.Д., Михайлова Т.В., Апекина Н.С. Эффективность метода ловушко-линий для оценки численности и структуры популяций рыжей полевки // Зоол. журн. 1995. Т.74. Вып.7. С.119-127.
7. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: УИФ "Наука". 1994. С. 149-159.
8. Злотин Р.И., Ходашова К.С. Роль животных в биологическом круговороте лесостепных экосистем. М.: Наука. 1974. 200 с.
9. Криволицкий Д.А., Покаржевский А.Д. Роль почвенных животных в биогенной миграции кальция и стронция-90 // Журн. общ. биол. 1974. Т.35. №2. С. 263-269.
10. Кузнецов Г.В., Михайлин А.П. Особенности питания и динамики численности рыжей полевки в условиях широколиственного леса // Млекопитающие в наземных экосистемах. Москва: Наука. 1985. С. 127-156.
11. Кулюкина Н.М. Возрастные особенности питания рыжей и обыкновенной серой полевок // Териофауна России и сопредельных

- территорий. Мат. междунар. совещ. 6-7 февраля 2003 г., Москва. 2003. С. 188.
12. Мухачева С.В. Сообщества мелких млекопитающих техногенных территорий Среднего Урала // Экология горных территорий. Популяционные аспекты. Нальчик. 1997а. С. 158-161.
13. Мухачева С.В. Морфофизиологические особенности населения рыжей полевки (*Clethrionomys glareolus* Schreber, 1780) в градиенте техногенного загрязнения среды обитания // Проблемы изучения биоразнообразия на популяционном и экосистемном уровне. Матер. конф. Екатеринбург. 1997б. С. 142-153.
14. Мухачева С.В. Воспроизводство населения рыжей полевки *CLETHRIONOMYS GLAREOLUS* (RODENTIA, CRICETIDAE), в градиенте техногенного загрязнения среды обитания // Зоол. журн., 2001. Т.80. № 12. С.1509-1517.
15. Мухачева С.В. Особенности питания рыжей полевки в условиях техногенного загрязнения среды обитания // Сиб. экол. журн. 2005. № 3. С.523-533
16. Мухачева С.В. Особенности пространственно-временного размещения населения рыжей полевки в градиенте техногенного загрязнения среды обитания // Экология. 2007. № 3. С. 131-137
17. Мухачева С.В., Безель В.С. Уровни токсических элементов и функциональная структура популяций мелких млекопитающих в условиях техногенного загрязнения (на примере рыжей полевки) // Экология. 1995. №3. С.237-240.
18. Мухачева С.В., Безель В.С. Роль мелких млекопитающих в формировании биогенных циклов химических элементов в наземных экосистемах // Биоразнообразие и роль зооценоза в естественных и антропогенных экосистемах, III междунар. науч. конф. [Днепропетровск, 4-6 окт. 2005 г.] 4-6 окт. 2005. Днепропетровск. Изд-во ДНУ. 2005. С. 488-490
19. Мухачева С.В., Безель В.С., Химическое загрязнение среды: тяжелые металлы в пище мелких млекопитающих // Зоол. журн. 2007. Т.86. № 5 С.
20. Покаржевский А.Д. Геохимическая экология наземных животных. Москва: Наука. 1985. 300 с.
21. Покаржевский А.Д., Исаев С.И. Миграция кальция в популяциях наземных животных // Экология. 1977. № 4. С. 47-50.
22. Потребность жвачных животных в питательных веществах и энергии. Москва: Колос. 1968. 414 с.
23. Юдакин В.А., Вартапетов Л.Г., Козин В.Г. Изменения населения наземных позвоночных при освоении нефтяных и газовых месторождений на севере Западной Сибири // Сиб. экол. журн. 1996. № 6. С. 573-583.
24. Baryshev V.B., Kulipanov G.N., Skrinky A.N. Review of X-ray fluorescent analysis using synchrotron radiation // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., 1986, A 246, P. 739-750.
25. Hansson Lennar *Clethrionomys* food: generic, specific and regional characteristics // Ann. zool. fenn. 1985. 22. № 3. P. 315-318.
26. Koutzenogii K, Savchenko T., Chankina O., Kovalskaya G., Osipova L., Bgatov A. Synchrotron Radiation X-ray Fluorescence Analysis of Biogenic Nature // J. Trace and Microprobe Techniques. 2003. 21. 2. P. 311-326.

THE INVOLVEMENT OF SMALL MAMMALS IN BIOGENIC CYCLES OF CHEMICAL ELEMENTS IN LAND-BASED ECOSYSTEMS

Bezel V.S., Mukhacheva S.V., Koutchenogii K.P., Savchenko T.I, Chankina O.V.

*Involvement of small mammals (by the example of the bank vole, *Clethrionomys glareolus*) in forming of biogenic cycles of chemical elements in natural ecosystems was analyzed. Accumulation of 21 chemical elements (K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Sr, Nb, Mo, Cd, Sn, I, Ba, Pb) in rations and bodies of bank voles and long-time abundance of animals under conditions of chemical pollution of environment and from control sites were estimated. It was shown that the intensity of the biogenic exchange of elements and its anthropogenic transformation is detected by their transit through gastrointestinal tract with food and by its accumulation in animals' biomass in following mineralization of died animals. Concentrations of certain elements (Ni, Mn, Pb) in rations exceeded their concentrations in voles' organisms 2-5 times, whereas for Zn, As, Cd reverse effects were detected. It was stated belief that small phytophagous mammals populations function as a specific barrier in common distribution of chemical elements among tropical levels under the conditions of environment chemical pollution.*