

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ ОРГАНИЗМОВ

УДК: 502.31:54+504.054:615.9

В.С. Безель, Е.А. Бельская, С.В. Мухачева, О.В. Чанкина², К.П. Куценогий²

Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН
ул. 8 Марта, 202, г. Екатеринбург, 620144 (Россия), bezel@ipae.uran.ru

²Институт кинетики и горения Сибирского отделения РАН
ул. Институтская, 3, г. Новосибирск, 630090 (Россия), koutsen@ns.kinetics.nsc.ru

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПИЩЕВЫЕ ЦЕПИ НАЗЕМНЫХ ЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ

Согласно современным представлениям пространственная химическая гетерогенность биосферы находит отражение в изменчивости биогеохимических пищевых цепей [1–3]. Данные по концентрациям химических элементов в популяциях живых организмов различной трофической принадлежности следует рассматривать не только в качестве показателей локальных потоков химических элементов, но и как мощный фактор гомеостаза окружающей среды [4]. Будучи лабильной, система трофических связей природных экосистем реагирует как на вариабельность элементного химического состава косной и биокосной основы биоценозов, так и на изменчивость обилия и видового состава живых организмов. При этом имеет место сложный многоуровневый геохимический портрет целостного биогеоценоза, определяемый неодинаковой биологической доступностью химических элементов, формой их соединений в почвах, спецификой зональных типов растительности, избирательностью процессов их поглощения и депонирования организмами различных трофических групп, а также с его возможной деформацией в процессе антропогенной деятельности [5–7].

В этих условиях положение В.В. Ковальского [3] о биогеохимических пищевых связях приобретает особое значение в качестве приоритетного подхода к мониторингу состояния природной среды, поскольку оно определяется тем, в какой мере сохранившиеся компоненты биоты способны выполнять биоценологические функции и, прежде всего, поддерживать необходимый уровень биогенного обмена. Чаще всего подобный биогеохимический мониторинг ограничивается определением содержания химических элементов, в том числе токсических, в почвах и растительности. Между тем устойчивое функционирование природных систем определяется целостной трофической структурой биоценоза, поскольку его высшие уровни, выступающие в качестве фак-

тора интенсификации и стабилизации биогенных циклов, часто испытывают максимальное токсическое воздействие. Низкое обилие организмов этих уровней, их подвижность и ограниченная биомасса, доступная для анализа, в значительной мере, усложняют процедуру такого мониторинга, требуя применения современных высокочувствительных аналитических методов.

Цель работы – оценить концентрации химических элементов (эссенциальных и токсических) в модельных видах живых организмов, принадлежащих к различным трофическим уровням наземных биоценозов, в фоновых условиях и при химическом загрязнении среды.

Материалы и методы исследования

В основу работы положены материалы, полученные в течение 2004–2008 гг. при изучении химического состава модельных широко распространенных видов животных, отражающих различные трофические уровни наземных биогеоценозов в зоне аэротехногенного воздействия крупного медеплавильного комбината (Средний Урал, зона южной тайги). Предприятие – Среднеуральский медеплавильный завод – расположено в 50 км от г. Екатеринбурга, действует длительный срок (с 1940 г.), зоны поражения вокруг него ярко выражены. Объекты для исследования были отобраны на разном удалении от источника эмиссии: в импактной (1–3 км от факела выбросов), буферной (4–10 км) и фоновой (20–30 км) зонах. В качестве критерия для выделения пробных площадей (не менее 3-х в пределах одной зоны) использовали уровни химического загрязнения почв, соответствующие фоновым (на уровне регионального фона), умеренным (буферная зона) и максимальным (импактная зона) уровням загрязнения. Подробное описание полигона исследований дано нами ранее [8, 9].

В качестве модельных объектов для исследования были выбраны живые организмы разных таксономических и трофических групп: фитофаги (личинки пилильщика (*Arge sp.*) и рыжая полевка (*Clethrionomys glareolus* Shreber) и плотоядные (жужелица ямчатоточечная (*Pterostichus oblongopunctatus* L.) и средняя бурозубка (*Sorex caecutiens* Laxmann)). Выбор объектов определялся доминирующим положением видов в составе сообществ беспозвоночных и млекопитающих, населяющих сравнимые территории, что обеспечило сбор необходимого количества материала для химического анализа. Элементный состав первичных продуцентов рассмотрен на примере листьев шиповника (*Rosa canina* L.) – кормовой основы беспозвоночных-фитофагов.

Личинок пилильщиков собирали вручную, жужелиц – в почвенные ловушки без фиксатора с последующим замариванием парами этилацетата. Отлов млекопитающих проводили одновременно на всех участках в июле 2004 г. разными орудиями лова в линейном варианте. Для последующего мультиэлементного анализа для каждого исследуемого участка было сформировано по 2-6 образцов насекомых и по 3-5 образцов млекопитающих (тушки без желудочно-кишечного тракта). Проанализировано 85 образцов, в том числе, растений – 15, насекомых – 30, млекопитающих – 40.

Всего в биологических объектах исследовано содержание 28 элементов, которые можно объединить в четыре группы: 1) жизненно необходимые (*S, K, Ca, Fe*); 2) высокотоксичные тяжелые металлы (*Pb, Cd*); 3) умеренно токсичные тяжелые металлы (*Zn, Cu, Co, Mo, Ni, Cr, Mn*); 4) малотоксичные элементы (*Ti, Ba, Sr, Zr* и др.).

Образцы высушивали в сушильном шкафу при температуре 70°C до воздушно-сухой массы. Дальнейший процесс пробоподготовки подробно описан ранее [10]. Пробы растительности и тканей животных анализировались в виде таблеток диаметром 1 см, массой 30 мг. Элементный состав биосубстратов был исследован методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА СИ) на станции элементного анализа Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ВЭПП-3) [11]. Спектры образцов снимали при энергии возбуждения 21 keV. Для получения количественного элементного состава применяли метод внешнего стандарта. Для этой цели использовали: россий-

ский стандарт злаковой травосмеси СОПМ 1 ГСО 8242-2003, как наиболее близкий к определяемым образцам.

Для статистической обработки данных использовали методы описательной статистики и кластерный анализ. Содержание химических элементов в различных объектах окружающей среды существенно варьирует, поэтому в анализе использованы среднегеометрические значения концентраций (x_i). Стандартное среднеквадратичное отклонение (σ_{gi}) в этом случае определено для величины $\ln(x_i)$. При этом из анализа исключены элементы, содержание которых в анализируемой пробе было ниже предела обнаружения использованного метода. Для кластерного анализа использовали данные о концентрации 15 элементов, определенных в образцах всех групп организмов (*Fe, Ca, K, Ti, Mn, Sr, Zr, Rb, Cr, Ni, Zn, Cu, Pb, Br, Cd*). При последующем анализе в качестве приоритетных загрязнителей были рассмотрены только те химические элементы, содержание которых в объектах с загрязненных территорий превышало фоновые значения (*Zn, Cu, Pb, Br, Cd, Cr, Rb*). Для этих элементов проведен сравнительный кластерный анализ трофической структуры для фоновых и загрязненных условий.

Результаты и их обсуждение

Концентрация элементов в живых организмах на фоновых территориях

Данные по концентрациям исследованных химических элементов в природных объектах, принадлежащих различным трофическим уровням в фоновых условиях и при химическом загрязнении среды, а также кларковые концентрации элементов в почве по В.В. Иванову [12], приведены в табл. 1 и 2.

Специфика активного взаимодействия живых организмов с геохимической средой проявляется в их способности накапливать химические элементы в больших или меньших концентрациях по сравнению с косными и биокосными компонентами биогеоценоза. Независимо от трофической принадлежности изученных модельных видов концентрационная функция, выраженная в повышенных по сравнению с кларками значениях, отмечена для *S, K, Br* и типичных металлов *Zn* и *Cd*. По отношению к другим элементам живые организмы выступают в качестве геохимических барьеров, в результате чего концентрации большинства химических элементов в живых организмах ниже их кларковых значений.

Таблица 1 Концентрации химических элементов в первичных продуцентах (листья шиповника) и животных фитофагах, мкг/г сух.веса

Содержание элементов, мкг/г (по Иванову, 1994)		Первичные продуценты и фитофаги													
		Листья шиповника						Личинки пилильщика				Рыжая полевка			
		фон		буфер		импакт		фон		импакт		фон		импакт	
		$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}
Содержание в кларке более 1000 мкг/г															
Fe	53300	148,29 (1,17)	5	85 (1,1)	5	219 (1,2)	5	116 (1,2)	5	185 (1,1)	5	362 (1,3)	5	298,0(1,1)	5
Ca	38100	19433,8(1,04)	5	19433,85(1,0)	5	19556 (1,1)	5	1814 (1,2)	5	867,1 (1,1)	5	24886(1,2)	5	32246(1,2)	5
K	21300	15104,6(1,25)	5	14574,2 (1)	5	13187 (1,2)	5	16562,2 (1,1)	5	17377(1,1)	5	9698 (1,1)	5	9928 (1,1)	5
Ti	5300	13,14(1,17)	5	8,1 (2)	5	12,0 (1,2)	5	4,6 (1,4)	5	4,7 (1,4)	5	3,5 (1,5)	5	2,4 (1,5)	5
Содержание в кларке от 100 до 1000 мкг/г															
Mn	900	344,86(1,5)	5	422 (1,3)	5	286,0 (1,9)	5	42,0 (1,2)	5	16 (1,2)	5	8,1 (1,3)	10	8,0 (1,4)	10
Ba	470	60,9 (1,2)	5	43 (1,5)	5	61,1 (1,3)	5	–	5	–	5	29,0 (1,2)	9	32,0 (1,2)	9
Sr	370	103,34(1,1)	5	108 (1,1)	5	122,0(1,2)	5	12,0 (1,3)	5	1,1 (1,2)	5	35,0 (1,2)	8	40,0 (1,2)	8
S	330	–	5	–	5	–	5	3763 (1,2)	5	5112 (1,1)	5	23181(2,1)	10	23420(1,2)	10
Cl	180	–	5	–	5	–	5	361 (1,1)	5	644 (1,2)	5	3391,(1,9)	10	2825 (1,1)	10
Zr	160	0,77 (1,97)	5	0,22 (1,2)	5	1,80 (1,5)	5	1,4 (1,7)	5	1,1 (2,0)	5	0,8 (1,8)	10	1,8 (1,6)	10
Rb	110	5,14 (1,16)	5	3,4 (1,2)	5	10,0 (1,3)	5	7,0 (1,7)	5	15,0 (1,5)	5	18,0 (1,2)	10	21,0 (1,1)	10
Содержание в кларке от 10 до 100 мкг/г															
Cr	92	0,99 (1,6)	5	2,3 (1,6)	5	2,0 (1,3)	5	0,83 (2,7)	5	2,5 (1,8)	5	0,8(1,4)	10	1,5(1,3)	5
Ni	70	11,38 (1,3)	5	2,3 (1,2)	5	15,0 (1,5)	5	1,2 (1,2)	5	1,1 (1,1)	5	1,8 (1,4)	10	2,4 (1,1)	5
Zn	68	25,5 (1,8)	5	33,0 (1,3)	5	46,0 (1,2)	5	72,0 (1,1)	5	156,1 (1,1)	5	94,0 (1,1)	10	95,0 (1,1)	5
Cu	53	5,71 (1,8)	5	4,7 (1,1)	5	11,0 (1,3)	5	6,8 (1,1)	5	13,0 (1,1)	5	6,0 (1,1)	10	7,0 (1,1)	5
Y	32	–	5	–	5	–	5	0,42 (1,1)	5	0,9 (1,3)	5	–	–	–	–
Co	23	–	5	–	5	–	5	–	5	–	5	0,09 (1,2)	10	0,08 (1,4)	5
Nb	21	–	5	–	5	–	5	–	5	–	5	–	10	–	5
Pb	13	4,24 (1,33)	5	2,3 (1,2)	5	37,0 (1,3)	5	1,6 (1,4)	5	13,4 (1,2)	5	1,7 (1,5)	10	8,0 (1,4)	5
V	12	0,57 (1,3)	5	0,43 (1,4,5)	5	0,41 (1,4)	5	–	5	–	5	0,09 (1,4)	10	0,07 (2,4)	5
Содержание в кларке от 1,0 до 10 мкг/г															
Cs	4,3	–	5	–	5	–	–	–	5	–	5	–	9	–	10
Br	2,4	1,74 (1,6)	5	1,4 (1,5)	5	1,2 (2,1)	5	4,3 (1,8)	5	4,2 (1,1)	5	18,0 (1,3)	10	16,0 (1,2)	10
Sn	2,3	0,30 (1,5)	5	0,3 (1,5)	5	1,3 (1,2)	5	0,22 (1,2)	5	0,37 (1,2)	5	0,21 (2,0)	9	0,73 (1,6)	9
As	1,8	–	5	–	5	–	5	–	5	–	5	1,4 (2,2)	7	0,49 (1,8)	7
Mo	1,2	–	5	–	5	–	5	0,27 (1,2)	5	0,15 (1,1)	5	–	5	–	7
Содержание в кларке менее 1,0 мкг/г															
I	0,47	0,57 (1,6)	5	0,24 (1,4)	5	0,47 (1,2)	5	–	5	–	5	0,18 (1,6)	9	0,91 (3,1)	4
Cd	0,17	0,53 (1,2)	5	0,41 (1,3)	5	2,6 (1,3)	5	1,5 (1,2)	5	11,8 (1,1)	5	0,46 (1,4)	9	2,2 (1,4)	4

$\langle x_i \rangle$ - среднее геометрическое значение концентрации элемента; σ_{gi} - стандартное отклонение $\langle x_i \rangle$; n_i - число зафиксированных значений концентраций, по которым проведено усреднение; – концентрация элемента ниже предела обнаружения метода

Таблица 2 Концентрации химических элементов в организмах вторичных консументов, мкг/г сух.вес

Содержание элементов, мкг/г (по Иванову, 1994)	Вторичные консументы												
	Жужелицы						Средние бурозубки						
	фон		буфер		импакт		фон		буфер		импакт		
	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	$\langle x_i \rangle$	σ_{gi}	n_i	
Содержание в кларке более 1000 мкг/г													
Fe	53300	96,1 (1,6)	11	186,1 (1,8)	6	194,0 (2,0)	11	115,3 (1,42)	6	120,0 (1,02)	6	128,0 (1,1)	4
Ca	38100	854,1 (1,6)	11	1062,0 (1,1)	6	754,0 (1,5)	11	16957,5 (1,3)	6	15067,1 (1,1)	6	18236 (1,3)	4
K	21300	6984 (1,1)	11	8043 (1,1)	6	7042,1 (1,2)	11	6068,84 (1,2)	6	7661,0 (1,06)	6	5955 (21,2)	4
Ti	5300	4,2 (1,8)	11	4,6 (1,7)	6	4,9 (1,5)	11	1,51 (2,3)	6	1,4 (1,1)	6	1,9 (1,7)	4
Содержание в кларке от 100 до 1000 мкг/г													
Mn	900	64,0 (1,3)	11	110,0 (1,4)	6	64,0 (1,7)	11	8,35 (1,6)	6	12,0 (1,0)	6	10,1 (1,4)	4
Ba	470	5,9 (2,7)	11	–	6	2,4 (1,1)	11	3,92 (2,8)	6	5,6 (1,0)	6	8,0 (1,4)	4
Sr	370	3,9 (1,2)	11	4,9 (1,5)	6	4,1 (1,3)	11	28,9 (1,3)	6	20,0 (1,1)	6	25,0 (1,4)	4
S	330	6354 (1,2)	11	–	6	7122 (1,4)	11	39939,3 (1,4)	6	33581,3 (1,1)	6	33399 (1,1)	4
Cl	180	1315,0(1,4)	11	–	6	1279,0 (1,5)	11	3074,2 (1,2)	6	3503,0 (1,1)	6	2625,0 (1,2)	4
Zr	160	0,59 (4,4)	11	0,80 (1,8)	6	0,23 (2,0)	11	0,1 (1,8)	6	0,06 (1,1)	6	0,07 (2,2)	4
Rb	110	2,2 (1,6)	11	1,5 (1,1)	6	2,1 (1,5)	11	9,8 (1,3)	6	5,5 (1,1)	6	5,7 (1,2)	4
Содержание в кларке от 10 до 100 мкг/г													
Cr	92	0,11 (3,4)	11	1,5 (1,2)	6	2,6 (3,0)	11	0,64 (1,3)	6	1,2 (1,9)	6	1,4 (1,6)	4
Ni	70	1,5 (1,4)	11	2,8 (1,6)	6	1,2 (1,4)	11	0,87 (1,4)	6	0,62 (1,0)	6	0,73 (1,3)	4
Zn	68	146,0 (1,1)	11	209,0 (1,1)	6	183,0 (1,3)	11	262,4 (1,4)	6	191,0 (1,5)	6	126,0 (1,2)	4
Cu	53	16,0 (1,7)	11	24,0 (1,2)	6	26,0 (1,6)	11	6,21 (1,1)	6	7,9 (1,2)	6	9,0 (1,1)	4
Y	32	0,1 (1,6)	11	–	6	0,17 (1,3)	11	0,45 (1,2)	6	0,35 (1,1)	6	0,25 (2,6)	4
Co	23	0,02 (1,4)	11	–	6	0,05 (1,8)	5	0,05 (1,3)	6	0,05 (1,0)	6	0,05 (1,1)	4
Nb	21	0,64 (1,8)	11	0,87 (1,8)	6	0,48 (1,6)	5						
Pb	13	1,4 (1,6)	11	4,7 (1,7)	6	8,8 (2,1)	11	5,41 (1,3)	6	76,0 (1,9)	6	66,0 (1,9)	4
V	12	0,95 (8,3)	11	–	6	0,22 (1,9)	11	0,19 (1,8)	6	0,08 (4,6)	6	0,21 (1,4)	4
Содержание в кларке от 1,0 до 10 мкг/г													
Cs	4,3	0,06 (1,89)	11	–	6	0,09 (1,1)	11	0,06 (1,1)	6	0,087 (1,1)	6	0,08 (1,2)	4
Br	2,4	17,0 (3,6)	11	5,0 (1,1)	6	14,0 (63,4)	11	11,4 (1,2)	6	17,0 (1,3)	6	12,0 (1,2)	4
Sn	2,3	0,17 (2,3)	11	–	6	0,19 (1,6)	11	0,65 (2,8)	6	0,17,0 (1,4)	6	1,1 (1,3)	4
As	1,8	–	11	–	6	1,1 (4,0)	5	–	6	–	6	–	4
Mo	1,2	0,46 (1,5)	11	0,28 (1,2)	6	0,48 (1,6)	11	0,24 (1,1)	6	0,3 (1,3)	6	0,31 (1,2)	4
Содержание в кларке менее 1,0 мкг/г													
I	0,47	0,33 (1,6)	11	–	6	0,62 (2,0)	11	0,33 (1,7)	6	0,9 (1,0)	6	0,49 (1,2)	4
Cd	0,17	3,7 (3,2)	11	12,0 (1,4)	6	6,6 (2,3)	11	0,31 (1,3)	6	0,61 (1,4)	6	0,63 (1,4)	4
Ag	0,07	0,11 (1,3)	11	–	6	0,11 (1,3)	5	0,07 (1,1)	6	0,08 (1,2)	6	0,08 (1,1)	4

$\langle x_i \rangle$ - среднее геометрическое значение концентрации элемента; σ_{gi} - стандартное отклонение $\langle x_i \rangle$; n_i – число зафиксированных значений концентраций, по которым проведено усреднение; – концентрация элемента ниже предела обнаружения метода

Сравнение с кларковым уровнем химических элементов не в полной мере отражает геохимическую специфику сообщества живых организмов, обитающих на конкретных исследованных территориях. В качестве основы биогенного обмена мы рассматривали растения, которые, будучи первичными продуцентами, прямо взаимодействуют с косными и биокосными компонентами биоценоза и отражают тем самым биогеохимическую специфику конкретных фоновых и загрязненных участков.

Большинство беспозвоночных и позвоночных хищников являются полифагами, поэтому при существующей сложной системе трофических отношений в природных системах невозможно выделить однозначные тро-

фические цепи. В связи с этим мы вынуждены рассматривать отдельные трофические уровни, представленные модельными видами продуцентов, фитофагов и плотоядных.

При подобном подходе роль звеньев пищевой цепи в концентрировании или дискриминации химических элементов может быть оценена при сравнении концентраций в различных организмах с их уровнем у первичных продуцентов. По сравнению с растительностью отмечено концентрирование таких элементов, как *Fe*, *Cu*, *Zn*, *Br*, *Rb*, *Zr*, *Cd*. Другие элементы (*Ca*, *Mn*, *Sr*, *Pb*) дискриминируются и накапливаются в животных- фитофагах и плотоядных в меньших концентрациях (рис. 1).

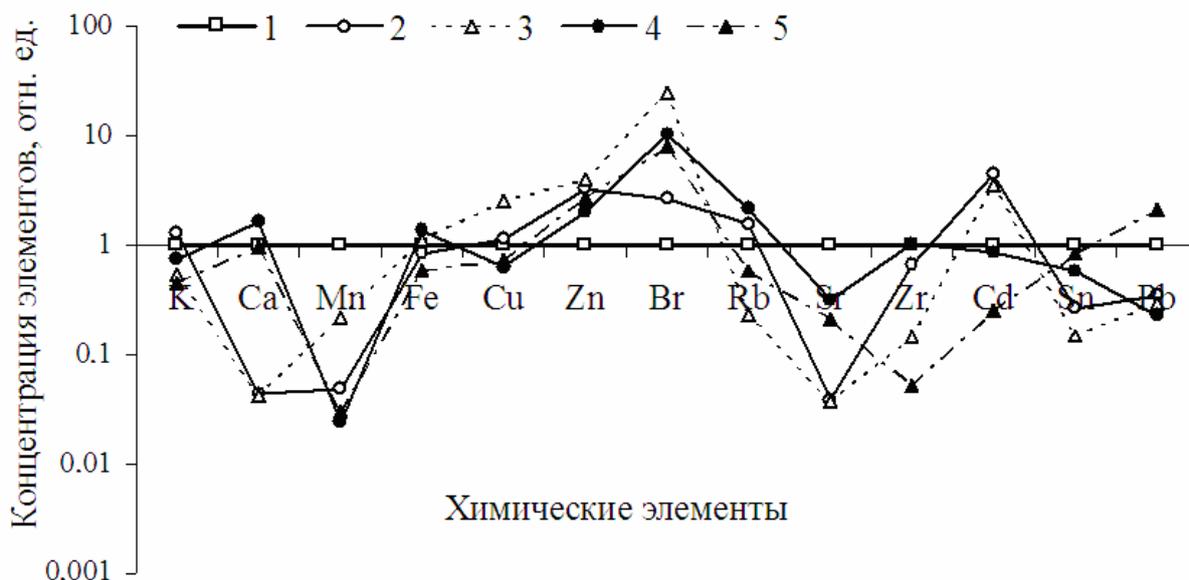


Рис. 1. Концентрация химических элементов (отн. ед.) в организмах различной трофической принадлежности по сравнению с уровнем элементов в растительных образцах (принят за 1) на фоновых территориях.

Примечание: 1 — шпоровик (листья), 2 — пилильщик (личинки), 3 — жужелица (имаго), 4 — рыжая полевка, 5 — средняя бурозубка.

Концентрация элементов в живых организмах на загрязненных территориях

Участие живых организмов в биогенных циклах может быть охарактеризовано спектром концентраций химических элементов. Для оценки своеобразия биоаккумуляции организмами различных трофических групп был проведен кластерный анализ концентраций 15 исследованных химических элементов. В результате анализа выборки с незагрязненной территории в один кластер объединились фитофаги — беспозвоночные (личинки пилильщика) и позвоночные (рыжая полевка). В

отдельные кластеры выделяются концентрации элементов в организме жужелиц и средней бурозубки (рис. 2). Сходная структура кластеров сохраняется и в условиях химического загрязнения.

Таким образом, при анализе рассмотренного выше спектра химических элементов, формирование биогенных циклов живыми организмами, в нашем случае определяется исключительно их принадлежностью к различным трофическим группам и не зависит от уровня загрязнения территории.

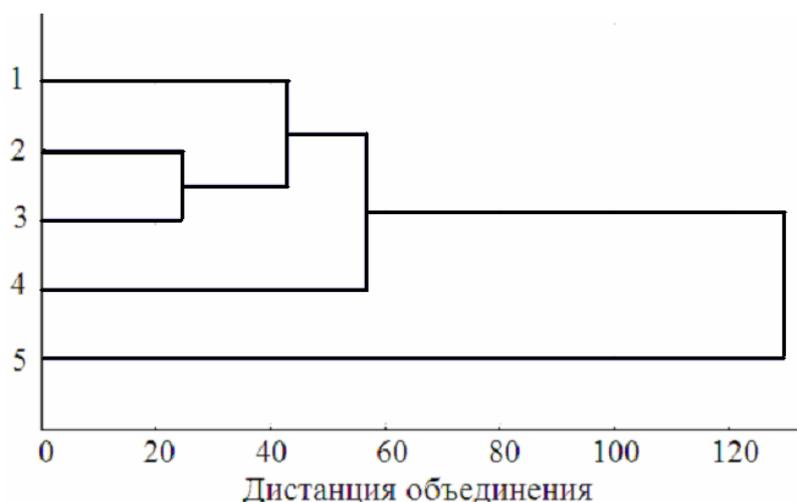


Рис. 2. Кластерный анализ концентраций 15 химических элементов, содержащихся в организмах животных различной трофической принадлежности.

Примечание: 1 – шиповник (листья), 2 – пилильщик (личинки), 3 – рыжая полевка, 4 – жужелица (имаго), 5 – средняя бурозубка.

Поскольку при загрязнении среды аэрогенными выбросами металлургических производств геохимическая специфичность импактных участков выражена повышенными концентрациями лишь нескольких элементов, то можно ожидать, что вклад отдельных трофических уровней в общий биогеохимический

обмен элементов в биоценозе будет неодинаков. С целью оценки подобных изменений проведен кластерный анализ концентраций только тех химических элементов, уровни которых в модельных объектах превышают фоновые значения. Таких элементов семь: Cr, Cu, Zn, Rb, Zr, Cd и Pb.

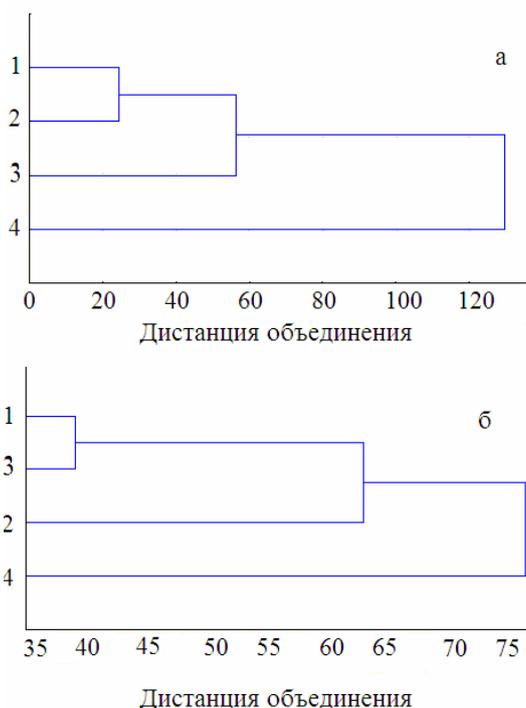


Рис. 3. Кластерный анализ концентраций химических элементов-загрязнителей (Cr, Cu, Zn, Rb, Zr, Cd, Pb) среды для фоновых (а) и загрязненных территорий (б).

Примечание: 1 – пилильщик (личинки), 2 – рыжая полевка, 3 – жужелица (имаго), 4 – средняя бурозубка.

На рис. 3 представлены результаты кластерного анализа вышеупомянутого спек-

тра элементов для фоновой и загрязненной территории. При отсутствии загрязнения вы-

деляются самостоятельные кластеры фитофа-принадлежности), жуужелиц и бурозубок (3а), что соответствует отмеченной выше общей закономерности (рис. 2). Иная картина отмечается в условиях интенсивного загрязнения (3б). Здесь кластеры беспозвоночных и млекопитающих выделяются независимо от их трофической принадлежности (рис. 3б), то есть в этом случае имеет значение таксономическая принадлежность модельных объектов. Возможными причинами этого могут быть особенности минерального метаболизма: обменные процессы, включающие поступление, депонирование и выведение химических элементов, протекают у беспозвоночных и теплокровных животных по-разному.

Отмеченная схема кластерной структуры отражает ряд разнонаправленных процес-

гов (независимо от их систематической сов в сообществе живых организмов. Речь идет о прямом токсическом действии металлов, в результате которого из рационов исчезают наиболее уязвимые группы организмов. В то же время, в организмах других видов концентрации химических элементов могут увеличиваться. Подобная смена видового и элементного состава рационов в условиях загрязнения среды отмечена рядом авторов. Так, в зоне действия Среднеуральского медеплавильного завода показано кардинальное изменение обилия и видового состава луговой растительности [13], беспозвоночных-хортобионтов [14], рационов птиц [15] и мелких млекопитающих [8].

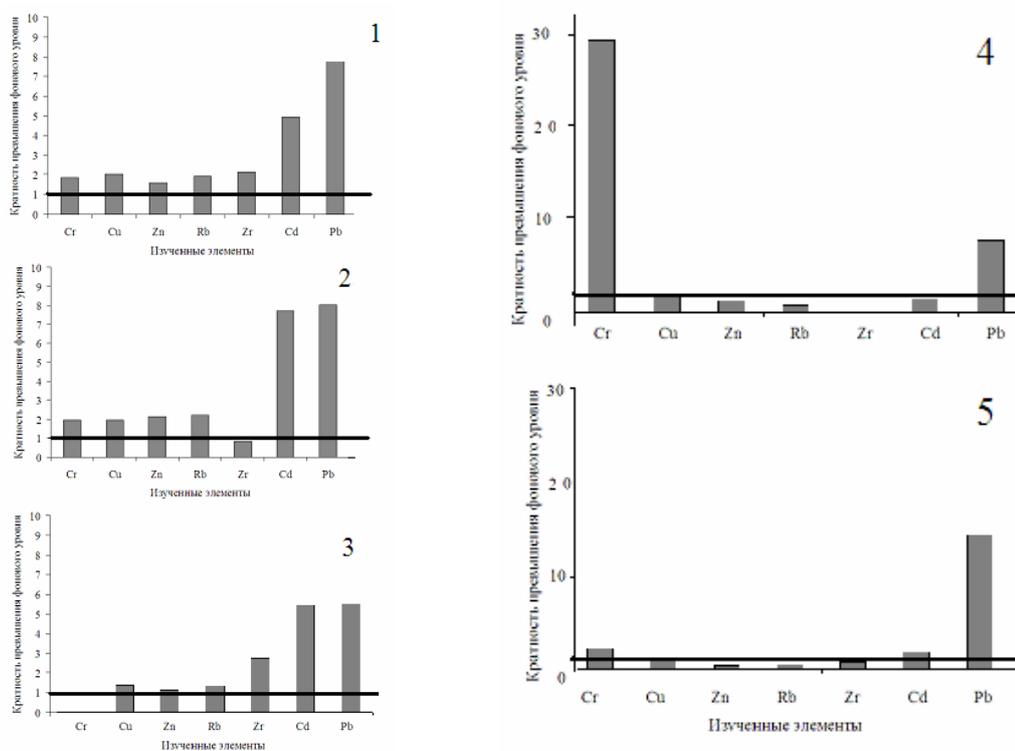


Рис. 4. Кратность увеличения концентраций химических элементов на наиболее загрязненных участках по сравнению с фоновыми.

Примечание: 1 – шиповник (листья), 2 – пилильщик (личинки), 3 – рыжая полевка, 4 – жуужелица (имаго), 5 – средняя бурозубка.

Необходимо заметить также, что величина дистанции Махаланобиса, отражающая сходство концентраций химических элементов различных объектов, на загрязненных участках существенно меньше того же показателя для фоновых условий (соответственно 75 и 135 отн. ед., рис. 4). Это свидетельствует о том, что при интенсивном химическом загрязнении среды концентрации химических элементов различаются у рассмотренных видов живот-

ных в меньшей степени, чем на незагрязненной территории.

Кластерный анализ дает некоторую интегральную оценку сходства химического состава разных групп живых организмов. Между тем каждый элемент в силу специфики минерального обмена может накапливаться в различной степени. Обычно подобная специфичность выражается через коэффициент концентрирования (отношение концентраций элемен-

тов на загрязненном участке к таковым на фоновом). На рис. 4 представлена кратность увеличения концентраций исследованных нами приоритетных загрязнителей. Из диаграммы следует, что у животных-фитофагов (личинки пилильщика, рыжая полевка) имеет место примерно одинаковое 2-8 кратное увеличение концентраций (*Pb*, *Cd*, *Zn*, *Cu*, *Rb*, *Zr*). У хищных видов (жужелицы, средняя бурозубка) существенный рост (в 10-30 раз) зарегистрирован лишь для *Pb* и *Cr*.

Таким образом, на фоновых территориях распределение концентраций химических элементов в живых организмах определяется их положением в трофической структуре природных биоценозов, отдельно выделяются группы первичных продуцентов, фитофагов и плотоядных видов. При загрязнении среды картина распределений концентраций химических элементов иная. Она, по-видимому, определяется спецификой минерального обмена и связана с принадлежностью видов к различным таксономическим группам. При этом различия в концентрациях химических элементов в организмах различных видов на загрязненных территориях менее выражены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В.И. Избр. соч., т. 5, М.: АН СССР, 1960. 422 с.
2. Виноградов А.П. // Геохимия, 3 (1963) С. 199.
3. Ковальский В.В. Геохимическая среда и жизнь. М.: Наука, 1982, 78 с.
4. Ермаков В.В., Тютюков С.Ф. Геохимическая экология животных. 2008. 314 с.
5. Покаржевский А.Д. Геохимическая экология наземных животных. М.: Наука, 1985. 298 с.
6. Криволицкий Д.А., Усачев В.Л., Рябцев И.А., Тарасов О.В. // Журн. общ. биол., Т.50. № 5 (1989). С. 595.
7. Лебедева Н.В. Экоотоксикология и биогеохимия географических популяций птиц. М.: Наука, 1999, 199 с.
8. Безель В.С., Куценогий К.П., Мухачева С.В., Савченко Т.И., Чанкина О.В. // Химия в устойчивом развитии. 2007. № 15. С. 33.
9. Мухачева С.В. // Экология, 2007. № 3. С. 178.
10. Koutzenogii K., Savchenko T., Chankina O., Kovalskaya G., Osipova L., Vgatov A. // J. Trace and Microprobe Techniques, 21, 2 (2003) 311 с.
11. Baryshev V.B., Kulipanov G.N., Skrinsky A.N. // Nucl. Instr. and Meth., A 246 (1986) 739 с.
12. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. М.: Недра, 1994. 304 с.
13. Воробейчик Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
14. Нестерков А.В., Воробейчик Е.Л. // Экология. 2009. № 4. С. 303-313.
15. Бельский Е.А., Бельская Е.А. // Экология. 2009. № 5. С. 363-371.

ХИМИЯЛЫҚ ЛАСТАНУ ЖАҒДАЙЫНДАҒЫ ЭКОЖҮЙЕ КӨҢІНІҢ БИОХИМИЯЛЫҚ ТІЗБЕГІ

В.С. Безель, Е.А. Бельская, С.В. Мухачева, К.П. Куценогий, О.В. Чанкина

Жер беті биоценоздарының әр түрлі трофикалық деңгейлеріне жататын тірі ағзалардың модельді түрлерінен, тіршілік үшін қажетті (S, K, Ca, Fe) және улылығы жоғары элементтердің (Pb, Cd), улылығы орташа (Zn, Cu, Co, Mo, Ni, Cr, Mn) және улылығы (Ti, Ba, Sr, Zr) төмен ауыр металдардың концентрациялары зерттелді. Органың фондық және химиялық металдармен ластанған деңгейлері қарастырылды. Қауіпсіз фитофагтар (Agre sp) және қатты улы (Pterostichus oblongopunctatus L.), сонымен қатар әр түрлі таксономиялық және трофикалық топқа жататын сүтқоректілердің екі түрі: өсімдікқоректі сұр тышқан (Clethrionomus glareolus Shreber, жәндіктермен қоректенетін құбатіс (Sorex caecutiens Laxmann) зерттелді. Химиялық элементтердің тірі ағзаларда таралуының табиғи биоценоздардың трофикалық құрылымы жағдайымен анықталатындығын көрсетті, осыған байланысты бірінші реттік продуценттер, фитофагтар және қатты улы түрлер бөлінеді. Органы ластау кезінде химиялық элементтердің таралу концентрациялары жануарлардың минералды айналым спецификасы мен олардың әр түрлі таксономиялық топтарға жатқызылуымен анықталады.

**BIOGEOCHEMICAL TROPHIC LEVELS OF TERRESTRIAL
ECOSYSTEMS UNDER CHEMICAL POLLUTION**

V.S. Bezel, E.A. Belskaya, S.V. Mukhacheva, K.P. Koutsenogii, O.V. Chankina

Concentrations of vitally important (S, K, Ca, Fe) and highly toxic elements (Pb, Cd), heavy metals possessing moderate toxicity (Zn, Cu, Co, Mo, Ni, Cr, Mn), and low-toxic elements (Ti, Ba, Sr, Zr) in the model animal species belonging to different trophic levels of terrestrial biocoenoses were investigated. Background areas and the regions chemically polluted with metals were considered. We studied invertebrate phytophages (larvae of sawfly Arge sp.) and carnivores (ground beetle Pterostichus oblongopunctatus L.), as well as two small mammal species belonging to different taxonomic and trophic groups: phytophagous bank vole (Clethrionomys glareolus Shreber) and insectivorous Laxmann's shrew (Sorex caecutiens Laxmann). It was shown that the distribution of concentrations of chemical elements in living organisms is determined by their position in the trophic structure of natural biocoenoses; thus the groups of primary producers, phytophages and carnivorous species are distinguished. Under environmental pollution, the character of distribution of the concentrations of chemical elements is determined by the specificity of mineral metabolism in animals and by their affiliation to different taxonomic groups.

