

## Микроэлементный состав растительности на территории техногенной галитной аномалии

© 2014. О. З. Еремченко, д.б.н., зав. кафедрой,  
О. А. Четина, к.б.н., доцент, Р. В. Кайгородов, к.б.н., доцент,  
Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
e-mail: eremch@psu.ru, lyamar11@rambler.ru, romankaygorodov@mail.ru

На территории Верхнекамского месторождения солей в зоне воздействия солеотвалов исследовано формирование микроэлементного состава растительности. Валовое содержание микроэлементов в почвогрунтах (слой 0–10 см) определяли атомно-абсорбционным методом, в листьях растений – методом оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Распределение Pb и Ni исследовали путём окраски срезов живого корня дитизином; для этого растения пересаживали на сосуды с растворами  $Pb(NO_3)_2$  и  $NiCl_2$  в концентрациях  $10^{-4}$  и  $10^{-3}$  моль/л. В нерастворимом остатке солевых отходов и в почвогрунтах зоны солеотвалов количество Cu, Mn, Pb, Co повышено по сравнению с зональной почвой и кларками почв мира. Растения из зоны воздействия солеотвалов по-разному накапливали металлы, количество которых в листьях колебалось в значительных пределах. Из 18 видов растений более половины видов характеризовались повышенным накоплением Ba, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn и Li относительно мировых и региональных кларков, что обусловлено, по-видимому, не только техногенным загрязнением, но и несбалансированностью минерального питания растений в условиях засоленной и подщелоченной почвенной среды. В опытах с инкубацией *Lactuca tatarica* и *Tussilago farfara* на растворах солей установлена барьерная функция корневой системы на пути поглощения Pb и Ni.

Selective accumulation of microelements in plants has been investigated in the zone of influence of salt-slag heaps in the Verkhnekamskoye salt deposit. The total content of microelements in soils (0–10 cm layer) was determined by atomic-absorption method in the leaves of plants – with the method of optical emission spectrometry with inductively coupled plasma. Distribution of Pb and Ni was stated by staining the sections of a living root with dithizone. Plants were transplanted to the receptacles with solutions of  $Pb(NO_3)_2$  and  $NiCl_2$  at concentrations of  $10^{-4}$  and  $10^{-3}$  mol/litre. The amount of Cu, Mn, Pb, Co in the insoluble residue of salt waste and in soil zones of salt-slag heaps is increased, as compared with the zonal soil and world soils clarks. Plants from the zone of salt dumps accumulated metals in different ways, the amount of these metals in the leaves varies within the great range. More than a half out of 18 plant species were characterized by increased accumulation of Ba, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn, and Li, as compared with the global and regional clarks. Presumably, it is due not only to a technogenic pollution, but also to the imbalance in mineral nutrition of plants in saline and alkalinized soil environment. In tests with *Lactuca tatarica* and *Tussilago farfara* incubation on salts solutions the root system function as a barrier of Pb and Ni absorption is established.

**Ключевые слова:** солеотвалы, техногенные поверхностные образования, растения, микроэлементы, избирательность накопления, защитная функция корня.

**Keywords:** salt-slag heaps, technogenic surface formations, plants, microelements, accumulation selection, protective function of a root.

Химический состав живого вещества в течение длительных периодов геологического времени формировался и приспосабливался к химическому составу окружающей среды. Организмы выработали механизмы активного извлечения элементов, участвующих в жизненных процессах, удаления и детоксикации токсичных избытков других элементов. С развитием теплоэнергетики, металлургической, горнодобывающей, химической промышленности происходит рассеивание техногенных элементов на поверхности Земли. Токсичность металлов обусловлена тем, что многие из них обладают высоким сродством к серосодержащим лигандам, образуют прочные соединения,

тем самым инактивируя ферменты. В зонах техногенных геохимических аномалий изменяется аккумуляция элементов в органах растений, однако реальная картина перераспределения химических элементов в компонентах растительного покрова зависит от физиологических особенностей растений. До сих пор не выявлены специфические механизмы поглощения тяжёлых металлов, благодаря которым столь сильно может различаться способность разных видов к их накоплению [1–5].

На одном из самых крупных в мире Верхнекамском месторождении солей ежегодный объём образования галитных отходов составляет около 20 млн т. Отходы размещены на 12

солеотвалах и шламохранилищах в городах Березники и Соликамск. Объектами исследований были растения зоны размещения галитных отходов производства калийных удобрений в г. Соликамске. Физиологические механизмы адаптации растений к избытку солей были исследованы ранее [6]. Предметом изучения данной работы были уровни и характер накопления некоторых металлов растительностью зоны устойчивого засоления.

При организации площадок для складирования отходов производилось выравнивание поверхности, отсыпка водоотводных ложбин, устройство дамб, перемешивание грунтов; в результате были уничтожены природные почвы, их функции выполняют техногенные поверхностные образования (ТПО). В зоне воздействия солей сформировались сообщества синантропных видов растений, которые в регионе произрастают у дорог, жилья, в посевах сельскохозяйственных растений.

Содержание микроэлементов в слое 0–10 см ТПО, нерастворимом остатке солевых отходов и в гумусовом горизонте дерново-подзолистой почвы определяли на спектрографе ДФС-1 атомно-абсорбционным методом с испарением пробы из угольного электрода и с контролем по стандартным образцам. Содержание микроэлементов в листьях растений определяли на спектрометре Perkim Elmer Optima 3300 XL методом оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и с контролем точности измерений по стандартным образцам.

Для изучения распределения свинца и никеля в растениях был использован гистохимический метод, основанный на окраске срезов живого корня дитизоном [7]. Отобранные

растения пересаживали в сосуды с растворами  $Pb(NO_3)_2$  и  $NiCl_2$  в двух концентрациях –  $10^{-4}$  и  $10^{-3}$  моль/л и инкубировали на этих растворах. Локализацию свинца и никеля по тканям корней определяли после 24, 48 и 120 час. инкубации.

Среднее содержание элементов в нерастворимом остатке отходов и в ТПО сравнивали с содержанием этих элементов в почвах мира по А. П. Виноградову [8] и в дерново-подзолистой почве региона исследований (табл. 1). В нерастворимом остатке солевых отходов относительно повышено количество Co, Mn, Cu, Pb.

Уровень содержания тяжёлых металлов (ТМ) в листьях разных видов синантропных растений, произрастающих у солеотвала, варьировал в широких пределах. Так, например, количество Cd у мари сизой (*Chenopodium glaucum* L.) составляет 0,02 мг/кг сухой массы, а у молочана татарского (*Lactuca tatarica* L.) на порядок выше – 0,39 мг/кг сухой массы, а Zn соответственно 31 и 13 мг/кг. Следовательно, произрастая в одних почвенно-геохимических условиях, растения значительно отличались накоплением ТМ, что обусловлено их биологическими особенностями, наличием физиологических барьеров защиты, регулирующих поступление элементов в органы растений.

Сравнение полученных данных с химическим составом растительности суши [9] показало, что из 18 видов растений более половины видов характеризовались повышенным содержанием Ba, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn и Li (рис.). Во всех растениях уровень накопления Sr превысил среднее содержание в растительности суши [9], возможно, из-за повышенной подвижности этого анионогенного элемента

Таблица 1

Содержание тяжёлых металлов в нерастворимом остатке отходов и техногенных поверхностных образованиях, мг/кг

Элемент	Содержание в нерастворимом остатке отходов	Содержание в ТПО	Содержание в дерново-подзолистой почве	Кларк по Виноградову [8]
Ni	50	53±4	40	40
Co	21	22±2	18	8
Cr	75	99±10	200	200
Mn	4000	3190±395	1500	850
V	110	110±15	70	100
Cu	135	119±15	50	20
Zn	90	99±6	150	50
Pb	40	35±3	18	10
Mo	3	2,9±0,2	–	2,0
Ba	400	450±48	500	500
Sr	350	280±20	200	300
Sn	3	3,9±0,2	4	10,0
Li	35	22±4	–	30

Примечание: «–» – менее предела обнаружения.

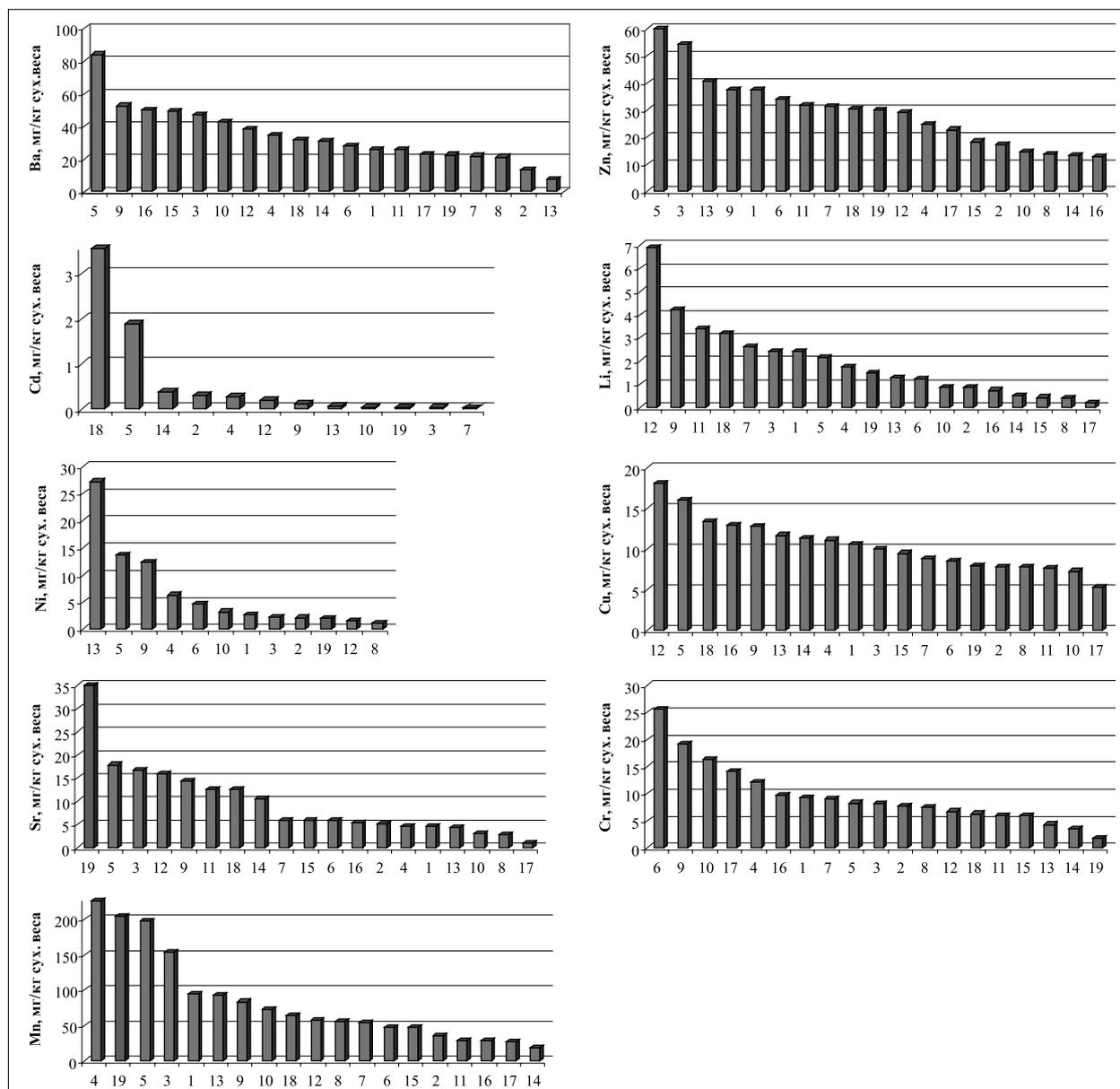


Рис. Содержание тяжёлых металлов в листьях растений:

1 – лебеда красивоплодная (*Atriplex calotheca* (Rafn) Fries), 2 – клоповник широколистный (*Lepidium latifolium* L.), 3 – льянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* L.), 4 – душистый колосок обыкновенный (*Anthoxanthum odoratum* L.), 5 – нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare* Lam.), 6 – горец птичий (*Polygonum aviculare* L.), 7 – марь сизая (*Chenopodium glaucum* L.), 8 – лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), 9 – мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* L.), 10 – мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), 11 – бодяк полевой (*Cirsium arvense* L.), 12 – чертополох курчавый (*Carduus crispus* L.), 13 – лебеда поникшая (*Atriplex patula* L.), 14 – молокан татарский (*Lactuca tatarica* L.), 15 – ястребинка (*Hieracium* sp.), 16 – донник белый (*Melilotus albus* Medik.), 17 –вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* L.), 18 – чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.), 19 – среднее содержание в растительности суши по В.В. Добровольскому [9].

в щелочной почвенной среде. Напротив, количество Sr и Mn было в несколько раз ниже кларков, по-видимому, из-за их низкой подвижности в щелочной среде. Накопление остальных элементов растениями регулируется сочетанием геохимического и систематического факторов. Повышенное накопление Ni, Cu, Cd, Zn могло проявиться у растений, не имеющих физиологических механизмов защиты от этих

элементов-загрязнителей. Растения с барьерными механизмами успешнее защищены от избытка металлов. Так, например, лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.) содержит Ni всего 1 мг/кг сухой массы, хотя лебеда поникшая (*Atriplex patula* L.) в этих же условиях накапливает Ni до 27 мг/кг сухой массы.

Содержание Sr и Ni у большинства исследуемых синантропных растений было выше

Таблица 2

Распределение Рb в тканях корневой системы молокана (*Lactuca tatarica*) и мать-и-мачехи (*Tussilago farfara*)

Вид	Содержание Рb в растворе, моль/л	Время, ч	Ткань						
			Пери-дерма	Наружная кора	Внутренняя кора	Эндо-дерма	Пери-цикл	Проводящие пучки	Паренхи-ма стели
Молокан татарский	10 <sup>-4</sup>	24	+/-	-	-	-	-	-	-
		48	++	+	+	+/-	-	-	-
		192	++	++	++	++	+/-	-	-
	10 <sup>-3</sup>	24	+	-	-	-	-	-	-
		48	+++	+/-	-	-	-	-	-
		192	+++	+	+/-	-	-	-	-
Мать-и-мачеха обыкновенная	10 <sup>-4</sup>	24	+	+/-	-	-	-	-	-
		48	+++	++	+	++	+/-	-	-
		192	+++	++	++	++	+/-	+/-	-
	10 <sup>-3</sup>	24	++	+	+	-	-	-	-
		48	+++	++	++	++	+	+/-	+/-
		192	+++	+++	++	++	+	+/-	+/-

Примечание: (+/-) – (++++) – степень окрашивания от очень слабого до очень интенсивного.

Таблица 3

Распределение Ni в тканях корневой системы молокана (*Lactuca tatarica*) и мать-и-мачехи (*Tussilago farfara*)

Вид	Содержание Ni в растворе, моль/л	Время, ч	Ткань						
			Пери-дерма	Наружная кора	Внутренняя кора	Эндо-дерма	Пери-цикл	Проводящие пучки	Паренхи-ма стели
Молокан татарский	10 <sup>-4</sup>	24	+	+/-	-	-	-	-	-
		48	+++	+	+/-	-	-	-	-
		192	++	+	-	-	-	-	-
	10 <sup>-3</sup>	24	+	+/-	-	-	-	-	-
		48	+++	++	+	+	-	-	-
		192	+++	++	++	++	-	-	-
Мать-и-мачеха обыкновенная	10 <sup>-4</sup>	24	++	+/-	-	-	-	-	-
		48	++	+/-	+/-	-	-	-	-
		192	+++	++	+	+	-	-	-
	10 <sup>-3</sup>	24	+++	++	++	++	+	+/-	-
		48	++++	+++	+++	+++	+	+/-	+/-
		192	++++	++++	+++	+	+	+/-	+/-

Примечание: (+/-) – (++++) – степень окрашивания от очень слабого до очень интенсивного.

установленных максимальных уровней их содержания в растениях [3].

Показателем избирательного поглощения ТМ растениями относительно почвы служит коэффициент биологического поглощения (КБП), который сопоставляет содержание элемента в золе организма с содержанием в почвенной среде. Все виды растений концентрировали Zn относительно почвенной среды, КБП у разных видов составил от 1,1 до 8,9. Избирательное накопление Zn связано, по-видимому, с высокой биогенностью этого элемента. Нивяник обыкновенный (*Leucanthemum vulgare* Lam.) отличался накоплением

Ba, Cu, Ni, горец птичий (*Polygonum aviculare* L.) и мать-и-мачеха (*Tussilago farfara* L.) – Cr, Ni, чертополох курчавый (*Carduus crispus* L.) – Cu, Li, лебеда поникшая (*Atriplex patula*) – Ni, ястребинка (*Hieracium* sp.) – Ba, вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* L.) и чина луговая (*Lathyrus pratensis* L.) – Ba, Cr, Cu. Ba, Cu, Ni – это элементы с коэффициентом биологического поглощения от 1 до 0,1; Li и Cr – элементы слабого и очень слабого биологического захвата, КБП = 0,1–0,001 [10]. Таким образом, растения у солотвалов поглощали элементы, которые не должны в них накапливаться относительно их содержания в ТПО.

Усиленное накопление металлов, вероятно, связано с несбалансированным минеральным питанием растений, произрастающих на ТПО, засоленных хлоридами натрия [7].

Большинство видов растений относятся к исключителям, т.к. накапливают ТМ в подземных органах, локализуя в ризодерме и коре [6]. Гистохимические исследования молокана татарского (*Lactuca tatarica*) и мать-и-мачехи обыкновенной (*Tussilago farfara*) из зоны солеотвалов, выдержанных в растворах солей никеля и свинца, подтвердили избирательность поглощения элементов. Отложения свинца в основном приурочены к клеткам ризодермы – основному барьеру на пути поглощения ионов корнем, а также в коре и эндодерме. Эндодерма служит физиологическим барьером для поступления свинца в центральные ткани корня, проводящие ткани, и далее – в наземные органы (табл. 2, 3).

Транспорт никеля отличался от транспорта свинца, никель локализовался не только в ризодерме, коре и в эндодерме, но и в сердцевине корневища мать-и-мачехи. Он был обнаружен в протопластах и в межклетниках клеток коры. Это говорит о том, что для никеля менее выражены физиологические барьеры в эндодерме – на тканевом и в плазмолемме – на клеточном уровне.

Молокан татарский отличался от мать-и-мачехи более выраженной барьерной функцией корневой системы в отношении исследуемых металлов.

### Выводы

1. Микроэлементный состав техногенных поверхностных образований зоны солеотвалов сформирован под влиянием отходов производства минеральных удобрений. В нерастворимом остатке отходов и в ТПО повышено содержание Cu, Mn, Pb, Co по сравнению с дерново-подзолистой почвой и с кларками почв мира.

2. Растения из зоны воздействия солеотвалов по-разному накапливали металлы, количество которых в листьях колебалось в значительных пределах. Из 18 видов растений более половины характеризовались повы-

шенным содержанием Ba, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn и Li, что обусловлено, по-видимому, не только техногенным загрязнением, но и несбалансированностью минерального питания растений в условиях засоленной и щелочной почвенной среды.

3. Модельные опыты с растениями из зоны солеотвалов показали избирательный характер поглощения металлов; эндодерма корневой системы служит физиологическим барьером, препятствующим поступлению Pb в жизненно-важные части растений; Pb накапливался в клеточных стенках корней растений; Ni слабее задерживался физиологическими барьерами тканевого и клеточного уровня корня растений. Молокан татарский (*Lactuca tatarica*) отличался более выраженными барьерными механизмами в отношении тяжёлых металлов по сравнению с мать-и-мачехой обыкновенной (*Tussilago farfara*).

### Литература

1. Baker A.J.M. Metal Tolerance // *New Phytol.* 1987. V. 106. P. 93–111.
2. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Изд-во Мир, 1989. 440 с.
3. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
4. Ковалевский А.Л. Биогеохимия растений. Новосибирск: Наука, 1991. 288 с.
5. Sanita di Toppi L., Gabbrielli R. Response to Cadmium in Higher Plants // *Environ. Exp. Bot.* 1999. V. 41. P. 105–130.
6. Еремченко О.З., Лымарь О.А. Почвенно-экологические условия зоны солеотвалов и адаптация к ним растений // *Экология.* 2007. № 1. С. 18–23.
7. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 253 с.
8. Серегин И.В., Иванов В.Б. Гистохимические методы изучения распределения кадмия и свинца в растениях // *Физиология растений.* 1997. № 6. Т. 44. С. 915–919.
9. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Академия, 2003. 400 с.
10. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 527 с.