

## АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Т. В. Жуйкова, Э. Р. Зиннатова

Нижегородская государственная социально-педагогическая академия  
Россия, 622031, Нижний Тагил, Красногвардейская, 57/1  
E-mail: hbfnt@rambler.ru

Поступила в редакцию 16.12.12 г.

**Аккумуляционная способность растений в условиях техногенного загрязнения почв тяжёлыми металлами.** – Жуйкова Т. В., Зиннатова Э. Р. – Представлены результаты исследования содержания тяжёлых металлов в почве, подземных и надземных органах *Plantago major* L., *Tussilago farfara* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Trifolium medium* L., *Melilotus albus* M., произрастающих на фоновых и техногенно нарушенных территориях. В условиях высокого загрязнения наблюдается сближение аккумуляционных способностей исследуемых видов по сравнению с фоновыми. В градиенте увеличивающегося химического загрязнения установлено снижение значений коэффициентов накопления и перехода тяжёлых металлов, что говорит о наличии защитных механизмов, которые начинают работать в области высокого содержания токсикантов в почве. Определены пороговые концентрации химических элементов в подземных органах, при которых «запускаются» защитные механизмы, препятствующие их избыточному накоплению в надземных частях. Самые низкие пороговые концентрации, а следовательно, минимальная токсическая нагрузка на растения характерны для *T. medium*, высокие – для *P. major*.

**Ключевые слова:** травянистые растения, тяжёлые металлы, аккумуляционная способность, пороговые концентрации, токсическая нагрузка на растения.

**Accumulating capability of plants in areas anthropogenically polluted with heavy metals.** – Zhuykova T. V. and Zinnatova E. R. – The paper deals with analysis of heavy metal content in the soil, epiterranean and subterranean parts of the following plants: *Plantago major* L., *Tussilago farfara* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Trifolium medium* L., *Melilotus albus* M. grown in both background and anthropogenically affected areas. Convergence of the accumulating capability of these plants in a polluted environment was detected. Within the increasing chemical contamination gradient a decrease of the accumulating and transition coefficients of heavy metals in the plants was revealed. Therefore, there exist some defense mechanisms working in cases of a high rate of contamination. Our study has revealed the threshold concentrations of several chemical elements in the subterranean parts of plants, which marks the level of defense mechanism activation to prevent accumulation of heavy metals in the epiterranean parts of the plants. The lowest threshold concentration and, therefore, the minimum loading rate are characteristic of *T. medium*, while the highest threshold concentration is determined in analysis of *P. major*.

**Key words:** grassy plants, heavy metals, accumulating capability, threshold concentration, toxic load on plants.

### ВВЕДЕНИЕ

Антропогенное воздействие является мощным экологическим фактором, по силе и разнообразию часто превосходящим естественные. Многочисленные исследования свидетельствуют о негативных последствиях загрязнения окружающей среды поллютантами техногенной природы, в том числе тяжёлыми металлами, которые

## АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТЕНИЙ

проявляются на всех уровнях организации биологических систем (Воробейчик и др., 1994; Гуральчук, 1994; Серегин, Иванов, 2001; Рассеянные элементы..., 2004; Безель, 2006; Безель, Жуйкова, 2007; Жуйкова, 2009; Чукина, Борисова, 2010; Фазлиева и др., 2012; Hall, 2002). Важное значение при этом имеет изучение уровней накопления тяжёлых металлов в биоте и механизмов, позволяющих длительное время организмам, популяциям и сообществам существовать на техногенно нарушенных территориях.

Настоящее исследование посвящено изучению аккумуляции тяжёлых металлов дикорастущими видами травянистых растений, произрастающими в условиях антропогенной трансформации почв, являющейся результатом деятельности железорудной промышленности, и определению пороговых концентраций поллютантов, при которых начинают работать защитные механизмы.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в период с 2009 по 2012 г. Сбор материала выполнен в окрестностях предприятий черной и цветной металлургии, основным из которых является ОАО Нижнетагильский металлургический комбинат (ОАО «НТМК», предприятие «Евраз Груп»), расположенный на Среднем Урале (Свердловская область, г. Нижний Тагил, южно-таёжная зона, 60° в. д., 58° с. ш.). В качестве приоритетных аэрогенных загрязнителей выступают тонкодисперсные пылевые частицы с содержанием ионов Cu, Ni, Pb, Cd, Zn, Cr (VI), As, Hg, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, фенол, дигидросульфид. Суммарный ежегодный выброс от промышленных источников в конце 1990-х гг. составлял 641.3 тыс. т, с 1994 г. отмечено снижение выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников до 200 тыс. т. В 2010 – 2011 гг. объем выбросов не превышал 108 тыс. т (О состоянии..., 2010).

В ходе исследования было определено содержание тяжёлых металлов в почве, подземных и надземных органах травянистых многолетних растений представителей различных семейств (Определитель..., 1994): сложноцветные (Asteraceae Dumort. (Compositae Giseke)) – одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg. s.l., 1964), мать-и-мачеха обыкновенная (*Tussilago farfara* Linnaeus, 1753); бобовые (Fabaceae Lindl.) – донник белый (*Melilotus albus* (Linnaeus, 1753) Medik.), клевер средний (*Trifolium medium* Linnaeus, 1753) и подорожниковые (Plantaginaceae Juss.) – подорожник большой (*Plantago major* Linnaeus, 1753). Это эврибионтные виды, широко представленные в составе фитоценозов как фоновых, так и техногенно нарушенных территорий.

Растительный материал собран в шести местообитаниях, почвы которых в разной степени загрязнены тяжёлыми металлами. В каждом биотопе было отобрано по десять растительных образцов (подземная и надземная части) исследуемых видов. Для изучения взаимосвязи в системе «почва – растение» в непосредственной близости от корневых систем растений отбирали почву. Объем собранного материала: надземные части – 300 образцов, подземные – 300, почва – 300 проб.

Почвенные образцы высушивали до воздушно-сухого состояния. Экстракцию подвижных форм тяжёлых металлов из почвы проводили 5%-ной HNO<sub>3</sub> (ОСЧ) в течение 24 ч (Алексеев, 1987).

Надземную и подземную часть каждого растения после предварительной подготовки (отмывание дистиллированной водой и высушивание до воздушно-сухого состояния) подвергали озолению в муфельной печи в течение 10 – 15 ч при  $t = 500^\circ\text{C}$ . Экстракцию металлов из растительных образцов проводили 70%-ной  $\text{HNO}_3$ . Определение содержания тяжёлых металлов (Cu, Zn, Cr, Fe, Co) в кислотных вытяжках почвы и растений выполнено методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на спектрофотометре AAS 300 («Perkin Elmer») (Хавезов, Цалев, 1983). Всего выполнено 4500 элемент-анализов.

Статистический анализ результатов проведен с использованием стандартных методов описательной статистики с вычислением среднего арифметического ( $M$ ), его ошибки ( $m$ ) и стандартного отклонения ( $S$ ). Зависимость между содержанием тяжёлых металлов в почве и растениях, а также в надземных и подземных органах оценивали корреляционным анализом с вычислением коэффициентов ранговой корреляции Спирмена ( $R_s$ ) и регрессионным анализом (определение коэффициентов детерминации  $R^2$ ). Для оценки сходства коэффициентов накопления (КН) и перехода (КП) у исследованных видов был проведен кластерный анализ (вычисление MSD дистанции). Анализ данных выполнен в ПСП Statistica, версия 6.0 для Windows (StatSoft Inc., 2001).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Содержание тяжёлых металлов в почвах.* В ходе исследования установлено, что среднее содержание тяжёлых металлов в перегнойно-аккумулятивном горизонте почвы регионального фона и техногенно нарушенных территорий в среднем изменяется от 7.35 до 951.49 мкг/г по меди, от 17.51 до 390.96 мкг/г по цинку, от 0.22 до 124.23 мкг/г по кобальту, от 7.14 до 36.31 мкг/г по хрому и от 376.62 до 2736.60 мкг/г по железу. Приоритетные загрязнители исследуемых территорий – железо, цинк и медь.

В качестве интегрального показателя загрязнения почв использован уровень суммарной токсической нагрузки ( $S_i$ ) (Безель и др., 1998), который на исследуемых территориях изменялся от 1 до 23 отн. ед. На основании данного критерия исследуемые территории были отнесены к фоновой ( $S_i = 1.0$  и  $2.55$  отн. ед.), буферной ( $S_i = 3.33$ ,  $6.19$  и  $8.36$  отн. ед.) и импактной ( $S_i = 22.78$  отн. ед.) зонам загрязнения. Названия зон даны в соответствии с номенклатурой ЮНЕП (Global..., 1973).

*Содержание тяжёлых металлов в подземных органах* исследуемых видов, произрастающих в данных биотопах, представлено в табл. 1. Концентрации отдельных микроэлементов в корнях растений одного и того же вида, произрастающего на участках с разным уровнем загрязнения, различается в десятки раз. Высокой накопительной способностью тяжёлых металлов в корнях по отношению к меди обладают *P. major*, *T. officinale*, *T. farfara*, к цинку – *P. major*, к железу – *M. albus*, *P. major*, *T. farfara* и *T. officinale*, к кобальту – *M. albus*, *P. major*, к хрому – *T. farfara*, *P. major*, *M. albus*.

При анализе связи между накоплением ионов металлов корневыми системами и уровнем загрязнения почв рассмотрен массив данных, полученных на всех участках. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, вычисленные для оценки этой связи, в большинстве случаев статистически значимы (табл. 2).

# АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТЕНИЙ

**Таблица 1**

Содержание тяжёлых металлов в растениях, мкг/г (среднее ± ош. ср.)

Токсическая нагрузка, отн. ед.	Содержание металлов, мкг/г					
	Cu <sup>2+</sup>		Zn <sup>2+</sup>		Fe <sup>3+</sup>	
	Корни	Листья	Корни	Листья	Корни	Листья
<i>Plantago major</i> L.						
1.0	10.22±0.15	2.08±0.30	18.45±1.11	12.37±0.78	358.20±6.84	238.51±32.24
2.55	5.36 ± 0.14	2.03±0.27	23.37±1.37	12.94±1.88	239.42±33.22	98.91±29.49
3.33	13.94 ± 0.92	2.19±0.46	20.42±0.20	15.34±1.65	275.44 ± 29.69	249.47±1.26
6.19	32.73 ± 2.89	32.37±1.46	107.92±7.44	49.26±2.45	6249.83±338.82	1867.47±45.47
8.36	24.46 ± 0.99	10.90±0.34	56.60±2.46	51.51±0.17	3345.44±138.66	1293.76±15.91
22.78	98.18 ± 6.38	19.28± 0.44	69.39±1.84	35.42±0.50	2455.35±74.54	676.58±13.29
<i>Tussilago farfara</i> L.						
1.0	15.51±0.43	3.20±0.16	8.05±1.81	2.32±0.16	434.12±12.78	261.82±68.60
2.55	15.08±0.39	1.97±0.21	7.76±0.87	4.06±0.45	160.51±6.82	40.69±3.49
3.33	12.06±0.52	5.05±0.03	8.75±0.28	4.64±0.17	411.42±11.42	419.10±35.45
6.19	22.76±1.16	8.19±0.63	22.14±0.93	20.08±0.79	600.01±60.70	467.96±57.93
8.36	18.02±0.40	4.36±0.18	13.86±2.26	4.87±0.30	467.91±23.85	294.57±40.83
22.78	123.0±4.06	41.85±8.54	17.53±0.87	14.45±0.14	2013.64±8.59	762.07±26.95
<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.						
1.0	20.04±1.86	3.53±0.03	11.72±0.39	8.30±0.28	256.80±2.87	76.72±2.50
2.55	11.65±0.93	2.07±0.40	14.96±1.48	12.36±0.82	327.58±34.94	90.98±6.31
3.33	22.36±0.95	3.13±0.21	21.55±3.32	12.91±0.99	580.10±26.09	95.82±7.25
6.19	29.54±0.64	7.26±2.15	27.58±0.40	9.73±0.67	632.34±19.35	120.02±5.26
8.36	22.00±2.06	6.76±0.69	28.25±0.83	22.50±4.24	1270.10±94.09	748.08±67.44
22.78	95.02±6.25	46.34±1.43	40.75±4.10	29.43±5.68	3306.50±216.38	1179.47±181.55
<i>Trifolium medium</i> L.						
1.0	8.73±0.42	2.89±0.10	17.71±2.62	3.75±0.11	396.10±15.98	77.78±11.20
2.55	7.50±0.56	2.06±0.30	19.71±2.56	3.02±0.39	142.83±17.04	52.47±9.81
3.33	7.87±0.71	2.13±0.14	9.61±0.94	4.59±0.81	109.47±14.60	102.99±6.06
8.36	13.60±0.94	7.12±0.23	18.83±0.90	9.13±1.35	494.73±63.32	378.12±27.13
<i>Melilotus albus</i> M.						
1.0	4.68±0.37	3.06±0.32	9.73±0.37	18.03±1.48	824.61±56.12	127.23±1.75
2.55	3.68±0.52	2.69±0.14	6.65±0.37	9.60±1.04	474.71±50.47	95.58±15.33
3.33	4.98±0.63	4.72±0.20	12.40±1.22	11.05±1.73	485.31±38.38	331.29±60.32
6.19	84.79±2.94	9.52±0.94	144.11±5.40	13.16±0.63	3083.83±169.53	120.99±5.27
8.36	8.36±0.73	6.35±0.73	15.07±0.80	11.91±0.61	1869.77±160.55	122.19±7.78
22.78	23.16±0.49	20.38±2.55	43.33±2.68	13.45±0.21	1577.33±20.72	1214.0±103.31

Для характеристики аккумулирующей способности растений и барьерной функции корней использован коэффициент накопления ( $KH = C_{\text{корней}} / C_{\text{почв}}$ ) (Безель и др., 1998), которых отражает корневое поступление ионов из почвы в подземные органы. В случае активной работы корневого барьера  $KH < 1$ . При беспрепятственном поступлении ионов металлов в органы растений  $KH \geq 1$ .

В табл. 3 приведены значения  $KH$  приоритетных загрязнителей почвы для изученных видов растений. Обращает на себя внимание факт относительно высоких  $KH$  меди у *T. officinale*, *T. farfara* на участках фоновой зоны. Концентратором железа в этих условиях выступает *M. albus*. При средних уровнях загрязнения (буферная зона) высокие коэффициенты накопления железа, достигающие 4 – 7 отн. ед.,

установлены для *P. major* и *M. albus*. В целом же в большинстве случаев исследуемый показатель не превышает единицу. При этом с ростом токсической нагрузки на участках наблюдается снижение значений коэффициентов накопления.

Таблица 2

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ( $R_s$ ) между содержанием металлов в корнях исследуемых видов растений и концентрацией соответствующих элементов в почве

Виды	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Cr <sup>2+</sup>
<i>P. major</i>	1.00***	0.88**	0.77	0.43	1.00**
<i>T. farfara</i>	0.83*	0.88**	0.94***	1.0***	0.83*
<i>T. officinale</i>	0.94***	0.88**	0.86**	0.94***	–
<i>M. albus</i>	0.94***	0.94***	0.77	1.00**	0.60
<i>T. medium</i>	0.80	0.40	0.40	0.26	–

Примечание. \* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$ ; \*\*\* –  $p < 0.001$ ; прочерк – не определено.

Кластерный анализ данных позволил сопоставить КН у исследуемых видов, произрастающих на фоновых и загрязненных территориях. В качестве примера рассмотрим КН меди, содержание которой в почве фонового и загрязненных участков различается в 130 раз (рис. 1). В градиенте увеличивающейся токсической нагрузки наблюдается сближение индивидуальных особенностей исследованных видов к накоплению меди. Евклидово расстояние, объединяющее всю выборку растений с фонового участка, равно 3.8 отн. ед., с загрязненных – 1.8 отн. ед. В фоновой зоне и на минимально загрязненном участке выделяются два кластера: в первый входят представители сем. Plantaginaceae и Fabaceae, во второй – сем. Asteraceae. На загрязненных участках в большей степени по КН меди от всех остальных видов отличается донник белый (MSD = 1.8). Как видно из табл. 3, для этого вида характерны самые низкие коэффициенты накопления меди.

*Содержание тяжёлых металлов в надземных органах.* Почти все исследуемые виды являются аккумуляторами тех или иных микроэлементов (см. табл. 1): *T. officinale* накапливает в листьях Cu, Zn, Fe; *T. farfara* – Cu, Co, Cr; *P. major* – Cu, Zn, Cr; *M. albus* – Fe, Co, Cr. Исключение составляет *T. medium*, для которого характерно низкое содержание в листьях Cu, Fe, Cr.

Таблица 3

Коэффициенты накопления тяжёлых металлов у исследуемых видов растений

Виды	Токсическая нагрузка, отн. ед.					
	1.00	2.55	3.33	6.19	8.36	22.78
1	2	3	4	5	6	7
КН <sub>Cu</sub> <sup>2+</sup>						
<i>P. major</i>	0.729	0.834	0.361	0.322	0.311	0.103
<i>T. farfara</i>	2.052	1.265	0.312	0.224	0.229	0.129
<i>T. officinale</i>	1.585	1.635	0.579	0.291	0.280	0.100
<i>M. albus</i>	0.501	0.382	0.129	0.835	0.106	0.024
<i>T. medium</i>	1.020	0.712	0.204	–	0.173	–

АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТЕНИЙ

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
$KH_{Zn}^{2+}$						
<i>P. major</i>	0.95	0.39	0.35	0.41	0.22	0.18
<i>T. farfara</i>	0.42	0.13	0.15	0.08	0.05	0.04
<i>T. officinale</i>	0.61	0.25	0.37	0.11	0.11	0.10
<i>M. albus</i>	0.93	0.16	0.21	0.55	0.06	0.11
<i>T. medium</i>	0.92	0.33	0.17	–	0.07	–
$KH_{Fe}^{3+}$						
<i>P. major</i>	0.46	0.64	0.29	7.43	2.63	–
<i>T. farfara</i>	0.56	0.43	0.43	0.71	0.37	–
<i>T. officinale</i>	0.33	0.87	0.60	0.75	1.00	–
<i>M. albus</i>	1.06	1.26	0.50	3.67	1.47	–
<i>T. medium</i>	0.51	0.38	0.11	–	0.39	–

Примечание. Прочерк – не определено.

По коэффициентам перехода (КП – отношение содержания ионов металлов в надземных органах к таковому в подземных) выявлена закономерность, установленная ранее для КН. В градиенте возрастающего загрязнения наблюдается сближение индивидуальных особенностей видов, отражающих транспорт ионов из корней в надземную часть и способность накапливать в последней тяжёлые металлы (MSD: Cu – фоновая зона = 4.1 отн. ед., импактная = 2.6 отн. ед.; Zn – 3.19 и 2.65 отн. ед.; Co – 5.5 и 4.6 отн. ед. соответственно; для железа MSD в фоновой и импактной зонах сходные – 3.7 отн. ед.)

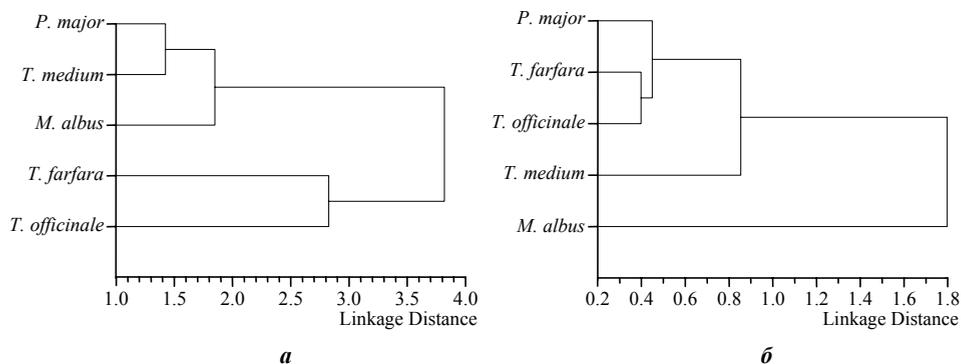
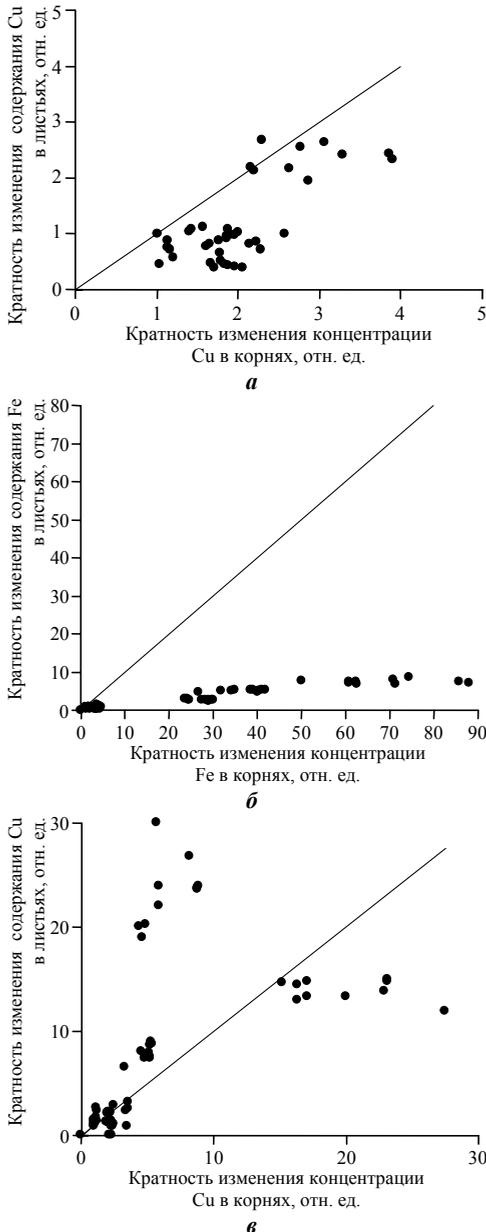


Рис. 1. Кластерный анализ коэффициентов накопления меди у исследуемых видов: а –  $S_i = 1.0 - 3.33$  отн. ед., б –  $S_i = 6.19 - 22.78$  отн. ед.

В условиях фона и в условиях максимального загрязнения по КП изученные виды делятся на две группы, в одну из которых всегда попадают представители семейства Asteraceae.



**Рис. 2.** Кратность изменения содержания тяжёлых металлов в листьях *Trifolium medium* (а) и *Plantago major* (б, в) в зависимости от изменения кратности их концентраций в корнях

Таким образом, ограниченная способность растений накапливать ионы тяжёлых металлов на загрязнённых территориях говорит о наличии защитных механизмов, которые начинают работать в области высокого содержания токсикантов в почве. Возможно, у представителей семейства Asteraceae независимо от уровня загрязнения почвы, работают «сходные» механизмы, регулирующие поступление тяжёлых металлов в растительный организм и способствующие их детоксикации, что снижает транспорт ионов в листья. Максимальное отличие от всех исследуемых видов по КП меди, как в фоновых, так и в техногенно нарушенных условиях, проявляет *M. albus*.

Наличие защитных механизмов наиболее ярко прослеживается при анализе кратности (отношение содержания тяжёлых металлов в корнях и листьях исследуемых видов к их минимальной концентрации) увеличения содержания тяжёлых металлов в подземных и надземных органах растений. В случае прямой пропорциональной зависимости между концентрацией металлов в корнях и листьях значения, отражающие эту взаимосвязь, должны быть максимально приближены к биссектрисе. В большинстве анализируемых случаев точки лежат ниже биссектрисы (рис. 2), что свидетельствует о наличии барьера, расположенного на границе «корень – побег». Следствием этого является защита надземных органов от избытка тяжёлых металлов. Наиболее ярко данный эффект проявляется у *P. major* при накоплении железа: 90-кратное увеличение данного элемента в корнях приводит

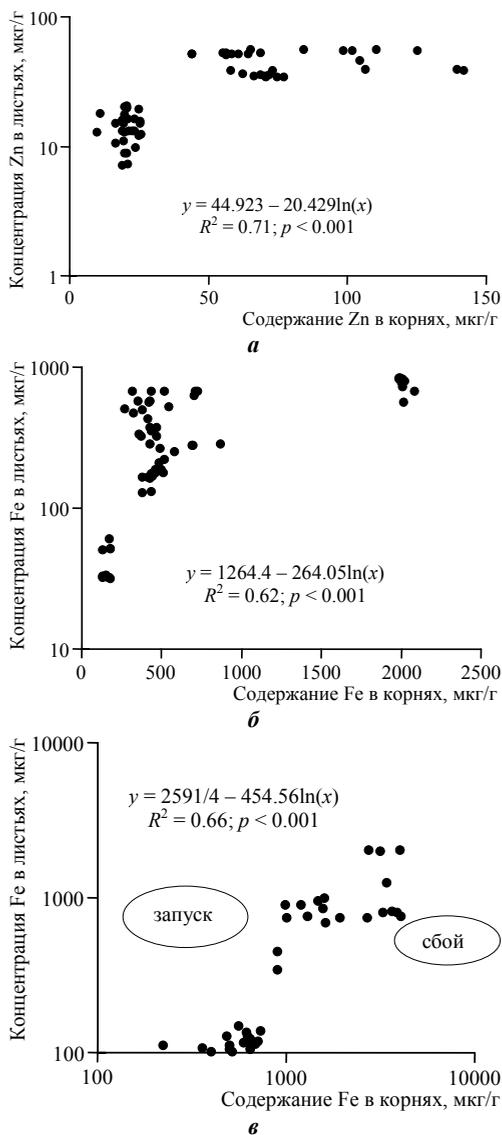
## АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТЕНИЙ

только к 7-кратному увеличению его в надземных органах (рис. 2, б). При 4-кратном увеличении меди в корнях *T. medium* ее содержание в надземных органах увеличивается в 2.5 раза (рис. 2, а).

Однако защитные механизмы растений по отношению к различным химическим элементам неодинаковые. При увеличении меди в корнях *P. major* в 30 раз ее содержание в надземных органах увеличивается в 15 раз (рис. 2, в). При этом у того же *P. major* при 5-кратном накоплении меди в корнях в надземных органах содержание данного элемента увеличивается в 30 раз.

Вышесказанное свидетельствует о том, что запуск защитных механизмов у растений происходит при определенных концентрациях, которые можно назвать «пороговыми». Включение защитных механизмов демонстрирует рис. 3. Так, при низких концентрациях железа и цинка в корнях *T. farfara* и *P. major* они беспрепятственно передвигаются в надземные органы. При достижении «пороговых» концентраций в подземных частях растений происходит стабилизация содержания соответствующих элементов в надземных органах (кривая выходит на плато). Однако дальнейшее увеличение ионов металлов в подземных органах может привести к нарушению защитной системы и вновь к росту их концентраций в надземных органах (рис. 3, в).

Нами были установлены концентрации ионов металлов в подземных органах, при которых «запускаются» защитные механизмы, препятствующие их избыточному накоплению в листьях (табл. 4). Логично предположить, что значения пороговых концентраций будут определяться степенью фитотоксичности микроэlemen-



**Рис. 3.** Зависимость между содержанием тяжёлых металлов в органах *P. major* (а), *T. farfara* (б), *T. officinale* (в)

та, его содержанием в почве и видовой специфичностью растений. Из табл. 4 видно, что максимальные пороговые концентрации характерны для железа; для меди и цинка они на несколько порядков ниже и относительно близки. Напомним, что в

**Таблица 4**  
Пороговые концентрации тяжелых металлов  
в корнях исследуемых видов растений, мкг/г

Виды	Химический элемент		
	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
<i>P. major</i>	33.0	50.0	1920.0
<i>T. farfara</i>	27.0	14.0	670.0
<i>T. officinale</i>	33.0	20.0	880.0
<i>M. albus</i>	30.0	15.0	1500.0
<i>T. medium</i>	9.0	10.0	120.0

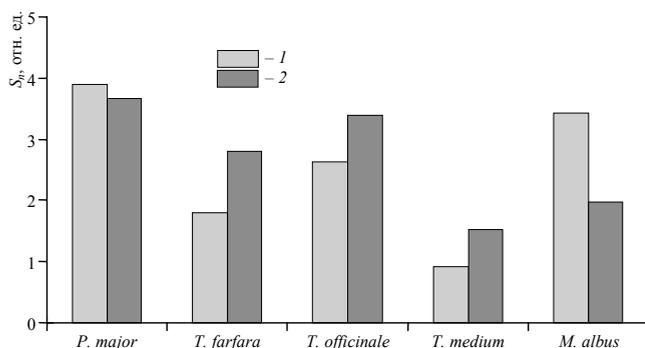
элементу.

Самое раннее включение защитных механизмов характерно для *T. medium*. Высокие пороговые концентрации отмечены для *P. major*, что свидетельствует о его металлоустойчивости и аккумулятивных способностях.

Отражением включения защитных механизмов, в конечном счете, является токсическая нагрузка на растения, для интегральной оценки которой был использован показатель  $S_n$ :

$$S_n = \frac{1}{n} \sum_i^n \frac{C_i}{C_f}, \text{ отн. ед.},$$

где  $C_i$  – концентрации элементов, которые рассматриваются в качестве приоритетных загрязнителей на техногенно нарушенных территориях,  $C_f$  – содержание соответствующих металлов в объектах фоновой зоны,  $n$  – количество элементов, включенных в анализ. Предлагаемый показатель может быть использован как для оцен-



**Рис. 4.** Токсическая нагрузка на подземные (1) и надземные (2) органы растений

*T. medium* (рис. 4). Таким образом, чем раньше запускаются защитные механизмы, тем в меньшей степени растительный организм подвергается токсическому воздействию поллютантов.

почве данные химические элементы находятся в аналогичном соотношении (см. табл. 1). В убывающем ряду фитотоксичности железо стоит после меди и цинка, что также обуславливает высокие пороговые концентрации по данному

элементу. Предлагаемый показатель может быть использован как для оценки общего загрязнения почвы, так и для определения уровня токсической нагрузки на растения (Безель и др., 1998; Безель, Жуйкова, 2010).

Вычисленные таким образом  $S_n$  показывают, что максимальное токсическое воздействие, превышающее фоновое более чем в 3.5 раза, испытывает *P. major*, минимальное –

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокие уровни загрязнения почв приводят к избыточному накоплению тяжёлых металлов в растительном организме. Приоритетными загрязнителями почвы исследуемых территорий выступают железо, цинк и медь. Выявлена видовая специфичность аккумулирующих способностей по отношению к исследуемым поллютантам. Максимальной аккумулирующей способностью по отношению к меди обладают *P. major*, *T. officinale*, *T. farfara*. Высокое содержание цинка в листьях характерно для *P. major* и *T. officinale*, железа – для *M. albus* и *T. officinale*, кобальта больше всего в листьях *M. albus* и *T. farfara*, хрома – у *T. farfara*, *P. major*, *M. albus*. В градиенте увеличивающейся токсической нагрузки наблюдается сближение индивидуальных особенностей видов к накоплению ионов металлов.

В условиях высокого загрязнения почв поллютантами у растений включаются защитные механизмы, в первую очередь, это ограничение проникновения тяжёлых металлов в клетку (иммобилизация ионов металлов в клеточной стенке, торможение транспорта ионов через плазмалемму, выделение их из клетки в окружающую среду) (Гуральчук, 1994; Башмаков, Лукаткин, 2009; Hall, 2002). В результате растение избегает их токсического влияния на внутриклеточные процессы. Кроме того, при высоких уровнях загрязнения запускаются внутриклеточные механизмы, к которым относятся образование комплексов тяжёлых металлов с различными лигандами (образование хелатов), компартментация тяжёлых металлов в вакуоли и т.д. (Титов и др., 2007).

Близкие КН и КП меди у *T. farfara* и *T. officinale* как в условиях низкого, так и в условиях высокого загрязнения свидетельствуют о сходстве аккумулирующих способностей у видов сем. Asteraceae. Виды сем. Fabaceae с фоновой территории также характеризуются сходными коэффициентами накопления. Можно предположить, что в естественных условиях среды и при загрязнении у представителей одного семейства формируются однотипные механизмы, которые регулируют поступление ионов металлов из внешней среды и их транспорт по растительному организму.

Как правило, при низких (нетоксичных) концентрациях ионов металлов в корнях они легко транспортируются по растению. Последнее было продемонстрировано на примере *P. major* в случае меди. Последующий рост концентраций ионов в подземных органах запускает защитные механизмы, препятствующие их передвижению в надземную часть растения. Физиологический смысл этого состоит в понижении концентраций химических элементов в тех участках, где наиболее активно протекают процессы биосинтеза. К числу таковых можно отнести задержку поглощения тяжёлых металлов корнями, хелатирование, иммобилизацию и детоксикацию ионов металлов в вакуоли (Серегин и др., 2003; Hall, 2002), изменение метаболизма в условиях действия тяжёлых металлов (синтез устойчивых к тяжёлым металлам ферментов (Фазлиева и др., 2012)). Дальнейшее повышение содержания ионов металлов в подземных органах приводит к сбою данной системы, и их концентрация в побегах увеличивается.

В качестве основных механизмов защиты надземных органов растений от избыточного накопления в них токсикантов могут выступать физиолого-биохими-

ческие процессы, происходящие в листьях растений, в качестве которых можно рассматривать детоксикацию ионов тяжёлых металлов компонентами антиоксидантной защиты, связывание металлов, выведение их избытка из клетки, повышение активности антиоксидантных ферментов, синтез антиоксиданта глутатиона, синтез пролина и полиаминов, изменение баланса фитогормонов (АБК, этилен) (Феник и др., 1995; Холодова и др., 2005; Серегин, Кожевников, 2006; Фазлиева и др., 2012).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Свердловской области (проект № 13-04-96056-р\_урал\_а) и Программы Президиума УрО РАН (проект № 12-И-4-2051).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Ю. В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л. : Агропромиздат, 1987. 142 с.
- Башмаков Д. И., Лукаткин А. С. Эколого-физиологические аспекты аккумуляции и распределения тяжелых металлов у высших растений / под ред. А. С. Лукаткина. Саранск : Изд-во Морд. ун-та. 2009. 236 с.
- Безель В. С. Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты / под ред. Е. В. Воробейчика. Екатеринбург : Гощицкий, 2006. 280 с.
- Безель В. С., Жуйкова Т. В. Химическое загрязнение среды : участие травянистой растительности в биогенных циклах химических элементов // Экология. 2007. № 4. С. 259 – 267.
- Безель В. С., Жуйкова Т. В. Роль травянистых растительных сообществ в формировании биогенных циклов химических элементов // Поволж. экол. журн. 2010. № 3. С. 219 – 229.
- Безель В. С., Жуйкова Т. В., Позолотина В. Н. Структура ценопопуляций одуванчика и специфика накопления тяжелых металлов // Экология. 1998. № 5. С. 376 – 382.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем : локальный уровень. Екатеринбург : Урал. изд. фирма «Наука», 1994. 280 с.
- Гуральчук Ж. З. Механизмы устойчивости растений к тяжелым металлам // Физиология и биохимия культурных растений. 1994. Т. 26, № 2. С. 107 – 117.
- Жуйкова Т. В. Реакция ценопопуляций и травянистых сообществ на химическое загрязнение среды : автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург, 2009. 40 с.
- Определитель сосудистых растений Среднего Урала / отв. ред. П. Л. Горчаковский. М. : Наука, 1994. 525 с.
- О состоянии окружающей природной среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области в 2009 году : гос. докл. / Мин-во природ. ресурсов Свердл. обл. Екатеринбург, 2010. 318 с.
- Рассеянные элементы в бореальных лесах / отв. ред. А. С. Исаев. М. : Наука, 2004. 616 с.
- Серегин И. В., Иванов В. Б. Физиологические аспекты токсического действия кадмия и свинца на высшие растения // Физиология растений. 2001. Т. 48, № 4. С. 606 – 630.
- Серегин И. В., Кожевникова А. Д., Казюмина Е. М., Иванов В. Б. Токсическое действие и распределение никеля в корнях кукурузы // Физиология растений. 2003. Т. 50, № 5. С. 793 – 800.
- Серегин И. В., Кожевникова А. Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения // Физиология растений. 2006. Т. 53, № 2. С. 285 – 308.
- Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам / Ин-т биологии КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2007. 172 с.

## АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РАСТЕНИЙ

Фазлиева Э. Р., Киселева И. С., Жуйкова Т. В. Антиоксидантная активность листьев *Melilotus albus* и *Trifolium medium* из техногенно нарушенных местообитаний Среднего Урала при действии меди // Физиология растений. 2012. № 3. С. 369 – 375.

Феник С. И., Трофимьяк Т. Б., Блюм Я. Б. Механизмы формирования устойчивости растений к тяжелым металлам // Успехи современной биологии. 1995. Т. 115, вып. 3. С. 261 – 275.

Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ. Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1983. 144 с.

Холодова В. П., Волков К. С., Кузнецов Вл. В. Адаптация к высоким концентрациям солей меди и цинка хрустальной травки и возможность их использования в целях фиторемедиации // Физиология растений. 2005. Т. 52. № 6. С. 848 – 858.

Чукина Н. В., Борисова Г. Г. Структурно-функциональные показатели высших водных растений из местообитаний с разным уровнем антропогенного воздействия // Биология внутренних вод. 2010. № 1. С. 49 – 56.

Global Environmental Monitoring System (GEMS) : Action Plan for Phase 1 SCOPE. Rep. 3. Toronto, 1973. 130 p.

Hall J. L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance // J. Exp. Bot. 2002. Vol. 53, № 366. P. 1 – 11.