

**Токсичность тяжёлых металлов для растений ячменя,
почвенной и ризосферной микрофлоры**

© 2016. С. Г. Скугорева^{1,2}, к.б.н., н.с., А. И. Фокина², к.б.н., доцент,
Л. И. Домрачева^{1,3} д.б.н., профессор

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
167982, Россия, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

³Вятская государственная сельскохозяйственная академия,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

e-mail: skugoreva@mail.ru

Исследовали состояние урбанозёмов на содержание тяжёлых металлов (ТМ) в зоне действия горно-металлургического комбината на территории г. Владикавказа (Республика Северная Осетия-Алания). Установлено, что почвы участков, расположенных вблизи ОАО «Электроцинк», имеют чрезвычайно высокий уровень загрязнения подвижными формами свинца и цинка, более чем в 200 раз превышающим значения фона и ПДК.

В ходе модельного эксперимента изучена аккумуляция ТМ растениями ячменя сорта Новичок. Установлено, что наибольшим накоплением цинка и свинца отличались растения, выращенные на загрязнённых почвах. Аккумуляция ТМ в корнях была выше, чем в побегах. Однако по сравнению с почвой корни содержали меньше ТМ: коэффициент накопления был меньше 1. С увеличением содержания ТМ в почве увеличивалось их содержание в корнях, однако при этом количество элементов в побегах мало изменялось, что свидетельствует о барьерной функции корней. Всё же даже незначительная аккумуляция побегами свинца (4 ПДК) и цинка (1,44 ПДК) в расчёте на сырую массу приводила к снижению накопления их биомассы в среднем в два раза. Согласно рассчитанным коэффициентам биологического поглощения свинец является элементом слабого накопления, а медь, никель и цинк – сильного накопления.

Изучение особенностей развития микробных комплексов в ризосферной и внешней почве показало, что наиболее сильное влияние ТМ оказывают на азотфиксирующие бактерии. Ризосферный эффект в загрязнённой почве не проявляется так ярко, что обычно бывает характерным для незагрязнённых почв. Существенное подавление всех групп изучаемых микроорганизмов (аммонификаторов, азотфиксаторов, грибов) отмечено на участке с максимальным уровнем загрязнения почвы ТМ.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, загрязнение почвы, сорбция, ячмень, ризосферные микроорганизмы, почвенные микроорганизмы, токсичность.

**Heavy metal toxicity and barley plants,
soil and rhizosphere microflora**

S. G. Skugoreva^{1,2}, A. I. Fokina², L. I. Domracheva^{1,3},

¹Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Division RAS,
28 Kommunisticheskaya st., Syktывkar, Russia, 167982,

²Vyatka State University,

36 Moskovskaya st., Kirov, Russia, 610000,

³Vyatka State Agricultural Academy,

133 Oktyabrsky Prospect, Kirov, Russia, 610017

e-mail: skugoreva@mail.ru

The state urban soil was researched as for heavy metals (HM) content within the area of mining and metallurgical complex in the city of Vladikavkaz (the Republic of North Ossetia-Alania). It was found that level of pollution of the soil in the sites located near the JSC «Electrozink» is extremely high. It is contaminated with mobile forms of lead and zinc, the contamination level is more than 200 times higher than the background values and MPC.

A model experiment was conducted, the accumulation of HM by barley plants of the species Novichok. It has been established that the greatest lead and zinc accumulation is characteristic of plants which are grown in contaminated soils.

The accumulation of HM in roots was higher than in shoots. However, the accumulation of HM in roots is less than in soil: accumulation ratio was less than 1. With the increase of HM in soil the content of HM in the roots also increased, at the same time the amount of HM in shoots changed just a little, which suggests the barrier function of roots. Yet, even a slight accumulation of lead (4 MPC) and zinc (1.44 MPC) in shoots as for wet weight lead to two times decrease in their biomass accumulation on the average. According to biological absorption coefficients calculated lead is an element of poor accumulation, while copper, nickel, and zinc – of strong accumulation.

The study of microbial complexes development in rhizosphere and in foreign soil has shown that HM have the strongest influence on nitrogen-fixing bacteria. Rhizosphere effect in polluted soil does not appear to be so evident that usually is typical of uncontaminated soil. Significant suppression of all groups of micro-organisms (ammonifiers, nitrogen-fixing bacteria, fungi) is noted on Site 5 with the maximum level of soil pollution with HM.

Keywords: heavy metals, contamination of soil, sorption, barley, rhizosphere microorganisms, soil micro-organisms, toxicity.

Загрязнение почвы тяжёлыми металлами (ТМ) стало одним из наиболее опасных последствий антропогенного воздействия на окружающую среду. Особенно резко меняется баланс ТМ на территориях, находящихся в зоне действия горнодобывающих и металлургических комбинатов. Вследствие этого происходит неизбежная аккумуляция металлов различными видами растений природных фитоценозов и сельскохозяйственных экосистем [1, 2]. Пресс ТМ ощущает также почвенная микробиота, реакция которой неоднозначна и зависит от систематического положения микроорганизмов (МО), типа почвы, характера высшей растительности, природы загрязнителей и других факторов [3–5]. В то же время именно бактерии, грибы и водоросли снижают металлотоксикоз почв при иммобилизации ТМ, которая осуществляется различными путями [6]. МО обладают молекулярными механизмами, регулирующими потребление ионов ТМ, адсорбцию их на внеклеточных полисахаридах, внутриклеточное распределение, хранение и вывод из клетки [7, 8]. В зависимости от уровня адаптационных возможностей МО к действию различных биоцидов, включая ТМ, происходят кардинальные перестройки и сапротрофных, и фототрофных микробных сообществ, как правило, с абсолютным доминированием немногих видов бактерий, водорослей и грибов [9–11]. В почвенных микробоценозах происходит не только адаптация МО к стресс-факторам. Имеются данные о влиянии ризобактерий на биодоступность и фитотоксичность соединений ТМ при выращивании растений на загрязнённой почве [12, 13]. МО меняют уровень поступления ТМ в растения в результате сорбционной активности, выработке метаболитов, изменяющих химическую форму металла и соответственно физико-химические свойства, находящие отражение в токсичности и биоаккумуляции. Данное влияние может быть использовано в оптимизации процессов фиторемедиации.

Вопрос о защитной роли ризосферной микрофлоры по отношению к высшим растениям актуален в двух аспектах: МО могут обеспечивать снижение уровня поступления ТМ в растения в результате сорбционной активности; при выращивании растений-фиторемедиаторов МО могут увеличивать активность поглощения ТМ растением.

Вопросам фиторемедиации загрязнённых территорий в настоящее время посвящены многочисленные исследования, в которых изучается миграция ТМ в системе «почва – растение», при этом рассматриваются как различные ТМ (цинк, медь, никель, свинец, кадмий), так и различные растения (салат листовой, перец сладкий, томаты, горох, ячмень, кукуруза, горчица белая, клевер, рапс и др.) [14–17]. В ходе проводимых экспериментов изучают распределение ТМ по органам растений [18], проводят серии исследований в вегетационных и полевых условиях с целью расширения списка растений, способных выполнять роль фиторемедиантов [19].

Одним из городов РФ, урбанозёмы которого загрязнены соединениями ТМ, является Владикавказ (столица Республики Северная Осетия-Алания). Сильнейшее загрязнение городских почв ТМ – основная экологическая проблема региона. Источниками загрязнения изучаемых урбанозёмов являются выбросы автотранспорта и металлургических заводов [20–22]. Проживание 48% населения республики на территории города делает крайне актуальной проблему исследования токсичности почвы для оценки экологической ситуации, решения вопроса о направлениях использования земель и принятия своевременных мер по сохранению здоровья населения.

Задачи данной работы – изучить влияние тяжёлых металлов на накопление биомассы растений ячменя, их аккумуляцию в органах растений, а также определить численность микроорганизмов в ризосферной и внешней почве, загрязнённой ТМ.

Объекты и методы

Опыт проводили с пробами почв (урбано-зёмов) г. Владикавказ, отобранными с территории, расположенной в зоне действия горно-металлургического комбината.

По результатам общего мониторингового исследования всей территории города и данных литературы были выявлены 8 наиболее загрязнённых участков, расположенных вблизи предприятия и находящихся в местах общей доступности для населения города [20].

Для отбора проб почв использован метод прикопок глубиной 0–5 см [23, 24]. Пробные площадки закладывали в соответствии с общепринятыми методиками химических и микробиологических исследований почв [23]. Участки обозначены на карте-схеме (рис. 1).

Выбор определяемых ТМ (свинец, медь, никель и цинк) обусловлен перечнем загрязняющих веществ, поступающих в окружающую среду в результате работы ОАО «Электроцинк». Определяли также кислотность почв и содержание органического вещества.

Валовое содержание ТМ и содержание их подвижных форм (извлекаемых аммонийно-ацетатным буфером) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии [25].

Содержание органического вещества определяли фотометрически по методу Тюрина в модификации ЦИНАО: по количеству образовавшегося иона хрома Cr^{3+} [26]. Кислотность – потенциометрически в водной и солевой вытяжках [27]. Механический состав почвы определяли методом раскатывания жгута [27].

В качестве фоновой взята проба почвы вблизи поселения Гизель, расположенного в Пригородном районе Северной Осетии, в 80 км к западу от Владикавказ.

Для изучения накопления ТМ растениями из урбано-зёмов г. Владикавказ был проведён модельный эксперимент. В пластиковые ёмкости объёмом 1 л насыпали почву массой 700 г. В сосудах выращивали растения ячменя сорта Новичок ПР-1 в течение 25 сут после появления всходов. Количество семян ячменя на сосуд составляло 30 шт. Сосуды с семенами помещали в контролируемые условия климатической камеры: фотопериод – 14 ч, освещённость – 1000 лк, температурный режим выращивания – 11°C (ночь)/20°C (день).

Через 25 сут растения извлекали из почвы, отделяли надземную часть и корневую систему, корни отмывали, определяли сырую массу частей растений в каждом варианте. Растительный материал фиксировали при 105°C, затем высушивали до постоянной

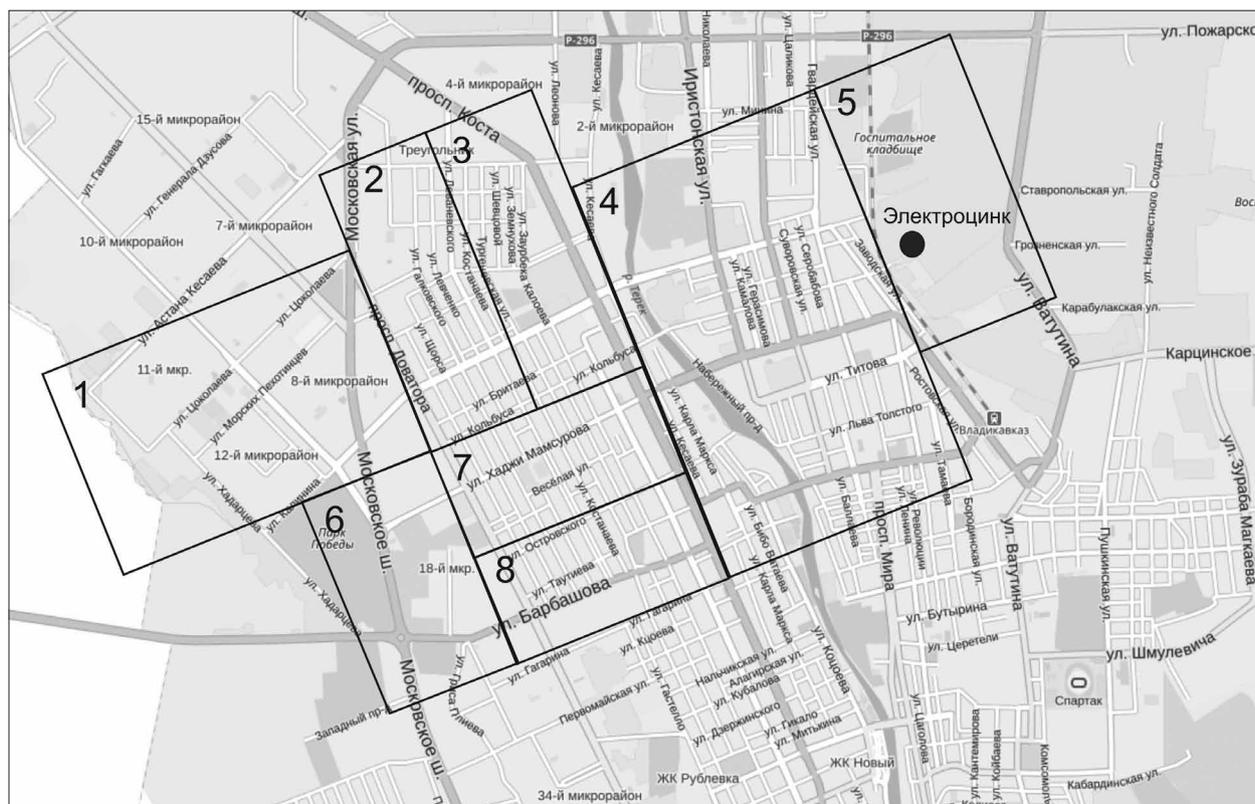


Рис. 1. Расположение участков отбора проб почвы в г. Владикавказе

Таблица 1

Кислотность, содержание органического вещества и тяжёлых металлов в пробах урбаноэмов г. Владикавказа

№ участка	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	Органическое вещество, %	Содержание ТМ, мг/кг				$\frac{Z_c(\text{подв.})}{Z_c(\text{вал.})}$
				Pb	Cu	Ni	Zn	
1	7,02	5,93	2,7±0,5	<u>149±31</u> 480±100	<u>2,0±0,5</u> 96±22	<u>0,43±0,18</u> 29±8	<u>490±160</u> 1400±500	<u>78</u> 15
2	6,55	5,53	7,3±0,7	<u>7,3±1,5</u> 43±9	<u>0,53±0,12</u> 26±6	<u>0,90±0,38</u> 30±8	<u>13±4</u> 102±34	<u>1,7</u> –
3	7,31	6,46	11,5±1,1	<u>162±34</u> 410±90	<u>2,1±0,5</u> 63±14	<u>0,93±0,39</u> 31±9	<u>420±140</u> 1500±500	<u>75</u> 15
4	7,60	6,93	11,0±1,1	<u>610±130</u> 1240±260	<u>5,3±1,2</u> 101±23	<u>0,91±0,38</u> 28±8	<u>470±150</u> 2000±700	<u>173</u> 27
5	6,60	6,06	5,0±0,7	<u>1860±390</u> 3700±800	<u>152±35</u> 620±140	<u>1,6±0,4</u> 32±9	<u>5900±1900</u> 13000±4000	<u>1174</u> 150
6	7,24	6,41	6,6±0,7	<u>13,9±2,9</u> 62±13	<u>0,95±0,22</u> 23±5	<u>0,54±0,22</u> 25±7	<u>56±19</u> 170±60	<u>7,7</u> 1,4
7	7,29	6,45	8,5±0,8	<u>96±20</u> 240±50	<u>3,1±0,7</u> 60±14	<u>0,42±0,18</u> 25±7	<u>1010±330</u> 1170±380	<u>120</u> 11
8	7,15	6,65	8,6±0,9	<u>48±10</u> 120±25	<u>1,07±0,25</u> 40±9	<u>0,22±0,09</u> 25±7	<u>480±160</u> 800±270	<u>56</u> 7
Фон	–	–	–	<u>5,0±0,9</u> 116±20	<u>0,66±0,11</u> 25±6	<u>0,9±0,4</u> 37±10	<u>10,3±2,9</u> 120±40	–
ПДК [34]/ ОДК [35]	–	–	–	<u>6</u> 130	<u>3</u> 132	<u>4</u> 80	<u>23</u> 220	–

Примечание. Над чертой приведены данные по содержанию подвижных форм, под чертой – валовых форм ТМ в почве. Прочерк обозначает, что данные отсутствуют или не могут быть определены. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие норматив; $Z_c(\text{подв.})$, $Z_c(\text{вал.})$ – суммарный коэффициент загрязнения почвы подвижными, валовыми формами ТМ. Измерения кислотности выполнены с отклонением результатов повторных измерений от среднего арифметического не более 0,1 ед. рН.

массы при 70°C. Содержание свинца, меди, никеля и цинка в растениях определяли методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторе «Экотест-ВА» [28]. Подготовку проб растений к анализу проводили по ГОСТ 26929-94 [29].

В ходе эксперимента определено содержание ТМ в растениях ячменя (табл. 4). Для характеристики депонирующих свойств корня рассчитан коэффициент задержки или акропетальный коэффициент (АК) как отношение содержания элемента в корне к его содержанию в побеге. Для сравнения аккумулирующей способности растений были рассчитаны коэффициент накопления (КН) и коэффициент биологического поглощения (КБП), которые равны отношению содержания элемента в сухой биомассе и в золе растения к его валовому содержанию в почве [30].

Определение численности почвенных МО в ризосферной и внешней почве проводили методом разведений с последующим посевом на агаризованные питательные среды: МПА (для

аммонификаторов), Эшби (для азотфиксаторов), Чапека (для грибов) [31]. Ризосферный эффект определяли путём деления численности МО в ризосферной почве к численности МО во внешней почве (Р/П).

Результаты и обсуждение

Характеристика проб урбаноэмов г. Владикавказа

В ходе химического анализа проб урбаноэмов, отобранных на территории г. Владикавказа, получены данные по актуальной и потенциальной кислотности, содержанию органического вещества, валовых и подвижных форм свинца, меди, никеля и цинка (табл. 1).

Реакция почвы оказывает большое влияние на развитие растений и почвенных МО. Согласно полученным данным, актуальная кислотность проб колеблется от слабокислой (№№ 2 и 5) до слабощелочной (на остальных участках), проба с участка № 1 имеет нейтральную реакцию. По кислотности солевой

вытяжки проба с участка № 2 является слабокислой, кислотность проб с других участков можно отнести к нейтральной (№ 5) или близкой к нейтральной реакции.

Содержание органического вещества варьирует в широких пределах: от 2,2 до 11,5%. Пробы почвы с участков № 1 и № 5 характеризуются низким (2,7%) и средним содержанием органического вещества (5,0%). В остальных пробах установлено повышенное и высокое содержание органического вещества, особенно в пробах №№ 3 и 4 (11 и 11,5% соответственно).

Основной особенностью проб урбаноэмов является их высокое загрязнение соединениями ТМ. За исключением проб с участков №№ 1, 6 и 8, установлено сверхнормативное содержание валовых форм свинца: кратность превышения ОДК варьировала от 1,8 для пробы № 7 до 28 для пробы № 5. Содержание подвижных форм свинца во всех пробах превышало ПДК и фон (6 и 5 мг/кг). Максимальные значения показателя определены в пробах №№ 4 и 5: ПДК превышено в 102 и 310 раз соответственно.

Высокие концентрации соединений меди установлены в почве участка № 5: содержание валовых форм элемента составило 620, а подвижных – 152 мг/кг, что выше норматива в 4,7 и 51 раз соответственно. Повышенным содержанием меди отличалась проба с участка № 4, кратность превышения ПДК по подвижным формам составила 1,8 раза. Содержание подвижных форм элемента в почвах всех участков превышало фон от 1,9 до 230 раз.

Содержание никеля во всех проанализированных пробах было в пределах ОДК и ПДК, кроме участка № 5, где содержание подвижных форм металла превышало фоновое значение в 1,4 раза.

В большинстве отобранных проб установлены высокие концентрации соединений цинка. Наибольшее содержание элемента установлено для проб №№ 1, 3, 4, 5 и 7. Отличительной особенностью большинства проанализированных проб является высокое содержание подвижных форм ТМ (до 260 ПДК), а также их высокая доля в валовом содержании элемента (до 86%). Относительно невысока концентрация валовых форм цинка в пробах №№ 2 и 6.

Для характеристики интегральной степени загрязнения проб урбаноэмов ТМ рассчитывали суммарный показатель загрязнения (Z_c). Он представляет собой сумму превышений коэффициентов концентраций ТМ и рассчитывается по формуле: $Z_c = \sum k_k - (n - 1)$, где k_k – коэффициент концентрации, n – число

аномальных элементов [32]. Коэффициент концентрации показывает кратность превышения содержания ТМ в точке опробования над его средним содержанием в аналогичной природной среде на фоновом участке. Z_c рассчитывали как для валовых, так и для подвижных форм ТМ.

Полученные показатели интегральной оценки загрязнения почв характеризуют степень загрязнения: $Z_c > 128$ – чрезвычайное загрязнение, $Z_c = 32-128$ – опасное загрязнение; $Z_c = 16-32$ – умеренно опасное загрязнение; $Z_c < 16$ – допустимое загрязнение.

Суммарный показатель загрязнения проб почв валовыми формами ТМ сильно различался: от незагрязнённой почвы участка № 2 ($Z_{c(вал.)} < 1$) до чрезвычайно опасно загрязнённой пробы № 5 ($Z_{c(вал.)} = 150$). Суммарный показатель загрязнения почв по подвижным формам ТМ гораздо выше, чем по валовым формам. Согласно рассчитанным значениям Z_c для подвижных форм ТМ, пробы с участков №№ 5 и 4 имеют чрезвычайно опасную, с участков №№ 1, 3, 7 и 8 – опасную степень загрязнения. Остальные пробы имеют допустимую степень загрязнения (№№ 2 и 6).

Таким образом, как по актуальной, так и потенциальной кислотности большинство проб являются близкими к нейтральным, за исключением слабокислой пробы № 2. Содержание органического вещества в пробах сильно варьирует: от низкого (№ 1) до высокого (№№ 3 и 4). Наиболее загрязнёнными соединениями свинца, цинка, меди являются пробы с участков №№ 5 и 4, расположенных в непосредственной близости от источника загрязнения – ОАО «Электроцинк». Чрезвычайно высокое содержание меди, цинка, свинца в почве на участке № 5 может приводить к высокому уровню заболеваемости детей, нарушениям репродуктивной функции женщин [33]. Пробы с наиболее удалённых от источника загрязнения участков (№№ 2 и 6) загрязнены ТМ в меньшей степени. Содержание подвижных форм цинка и свинца, относящихся к первому классу опасности, на всех участках превышает фон и ПДК. Подвижные формы ТМ являются доступными для растений и могут аккумулироваться ими в больших концентрациях.

Влияние тяжёлых металлов на растения ячменя

Накопление биомассы

Влияние ТМ на растения изучали в ходе модельного опыта. Для этого на почвах, ото-

бранных в г. Владикавказе, в течение 25 сут выращивали ячмень сорта Новичок. У 25-суточных растений определяли накопление сырой и сухой биомассы корнями и побегами (табл. 3).

Высокие значения накопления биомассы побегов и корней характерны для растений, выращенных на почве участка № 3. Почва данного участка имеет кислотность, близкую к нейтральной, высокое содержание органического вещества (табл. 1).

Установлено, что наименьшим накоплением биомассы отличались побеги растений, выращенных на почве участка № 5, наиболее загрязнённого соединениями меди, цинка и свинца. Минимальное накопление биомассы отмечено для корней растений, выращенных на почве участка № 2.

Низкое накопление биомассы побегов и невысокое накопление биомассы корней растений, выращенных на почве участка № 5, может быть связано с высоким содержанием ТМ в почве. Накопление биомассы зависит не

только от химического, но и от механического состава почвы. Вероятно, низкое накопление биомассы корней и относительно невысокое накопление у побегов ячменя на почве участка № 2 связано с тяжёлым механическим составом почвы – почва данного участка глинистая, не исключено и то, что почва содержала кроме ТМ и другие поллютанты.

Кроме того, содержание ТМ в побегах ячменя пересчитывали на сырую массу и сравнивали со значениями ПДК для растениеводческой продукции (табл. 3). Выявлено, что содержание меди в побегах ячменя, выращенного на почвах, отобранных со всех участков, не превышает норматива [36].

Концентрация свинца в побегах растений была выше в 1,8–4,7 раза норматива для всех почв (исключение – участок № 7), что позволяет считать растения, выращенные на данных почвах, загрязнёнными свинцом. Наибольшее накопление элемента в побегах 25-суточных растений ячменя характерно для почвы участка № 5 (2 мг/кг), что, вероятно,

Таблица 2

Накопление биомассы 25-суточными растениями ячменя при выращивании на урбанозёмах г. Владикавказ (модельный опыт)

№ участка	Масса корня, мг/растение		Масса побега, мг/растение	
	сырая	сухая	сырая	сухая
1	246±41	16,9±3,3	580±90	45±8
2	117±28	8,9±2,0	440±90	41±9
3	232±34	12,8±3,7	730±210	56±13
4	199±29	14±4	536±70	49±14
5	164±32	10,9±2,3	251±29	22±6
6	175±41	12±4	640±190	51±16
7	168±44	9,6±2,3	630±160	37±8
8	137±43	7,7±2,0	610±170	45±10

Примечание: жирным шрифтом выделены минимальные значения.

Таблица 3

Содержание тяжёлых металлов в побегах ячменя, мг/кг сырой массы

№ участка	Pb	Cu	Zn
1	0,90	0,83	14,4
2	0,73	0,37	2,6
3	1,00	0,97	10,4
4	1,74	0,91	6,0
5	2,02	1,84	14,4
6	1,43	1,08	5,1
7	0,28	1,35	3,8
8	1,22	0,75	7,3
ПДК [36]	0,5	5	10

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.

приводило к снижению накопления сырой биомассы побегами (табл. 2). В побегах растений накапливался и цинк: содержание цинка было выше норматива СанПин в 1,44 раза.

Аккумуляция тяжёлых металлов растениями

Свинец. Содержание элемента в растениях ячменя сильно варьировало: от 5,5 до 118 мг/кг сухой массы. Максимальным содержанием свинца – 23 и 118 мг/кг в корнях и побегах соответственно – отличались растения, выращенные на почве участка № 5. Для всех растений характерно большее накопление элемента в корнях (табл. 4), о чём свидетельствует акропетальный коэффициент (АК), больший единицы: от 1,23 до 14,3.

В ходе работы были рассчитаны коэффициенты накопления свинца растениями (КН). КН варьировали в пределах от 0,01 до 0,45. Как видно из данных таблицы 4, КН свинца невысокие у растений на участках с высоким содержанием элемента в почве (№№ 4 и 5). При низком содержании элемента в почве накопительная способность растений увеличивается. Так, на малозагрязнённых участках №№ 2 и 6 КН гораздо выше, чем на загрязнённых участках.

Показателем степени накопления элементов растениями является коэффициент биологического поглощения (КБП). Он позволяет косвенно судить о степени доступности элемента для растений и его поведении в системе «почва – растение». Согласно шкале [37] к элементам сильного накопления ($10 > \text{КБП} \geq 1$) относятся медь, никель и цинк, к элементам слабого накопления ($1 > \text{КБП} \geq 0,1$) – свинец.

Для исследованных растений КБП для свинца был ниже 1 только в случае загрязнённых почв. На участках с небольшими количествами элемента в почве КБП был выше единицы (на участках №№ 2 и 6).

Согласно современным представлениям накопление свинца в корнях является защитным механизмом растений. Установлено, что часть подвижных форм свинца под действием корневых выделений переходит в менее активное состояние или адсорбируется на внешней поверхности корней. Поглощённый корнями свинец задерживается в свободном клеточном пространстве или используется в процессах метаболизма. Только часть катионов свинца (около 3%) с ксилемным током транспортируется в надземные органы [38].

Медь. Концентрация меди в растениях колебалась от 4 до 79 мг/кг сухой массы. Наибольшим содержанием элемента отличались

растения, выращенные на почвах участков №№ 4 и 5, содержащих наибольшее её количество. Для большинства растений характерна аккумуляция меди в корнях. Исключение составили растения участков с минимальным содержанием элемента в почве – №№ 2 и 6 – АК составил для них 0,43 и 0,49 соответственно. Ячмень, выращенный на почвах участков №№ 7 и 8, накапливал элемент в равной степени в корнях и побегах (АК ≈ 1).

КН меди растениями был во всех вариантах меньше единицы (0,03–0,65), т. е. растения содержали элемент в меньшем количестве, чем почва. В отличие от неэссенциального для растений свинца, медь характеризовалась значениями КБП выше единицы или близкими к ней, за исключением наиболее загрязнённого участка № 5. Для данного участка побеги растений имели КБП = 0,21, основное количество элемента накапливалось в корнях ($C = 18,4$ мг/кг, КБП = 0,92), который, по-видимому, играл роль защитного барьера на пути проникновения избыточных концентраций элемента в побег. Таким образом, полученные данные подтверждают данные литературы [37], и медь можно отнести к элементам сильного накопления ($10 > \text{КБП} \geq 1$).

Никель. При выращивании модельных растений на урбанозёмах г. Владикавказа не отмечено накопления элемента растениями ячменя. Исключение составили растения, выращенные на почве участка № 5. Корни ячменя на данном участке накапливали никель в большей степени по сравнению с побегами: АК > 1 . Лишь в корнях элемент накапливался из почв участков № 1 и № 7. Однако и на данных участках содержание элемента в растениях было ниже, чем в почве, КН < 1 . Таким образом, как почвы со всех участков, так и растения, выращенные на этих почвах, не являются загрязнёнными соединениями никеля.

Цинк. По сравнению с другими исследованными ТМ, содержание цинка в растениях было на порядок выше. Концентрация элемента в ячмене изменялась от 28 до 1820 мг/кг сухой массы. Максимальным содержанием элемента (1450 и 1820 мг/кг) отличались растения участков №№ 4 и 5, почва которых содержала до 13 г/кг, или 1,3% цинка (№ 5) (табл. 1). Для растений характерна наибольшая аккумуляция цинка в корнях. АК во всех случаях был выше 1, особенно высок он на загрязнённых участках №№ 4 и 5 – 22 и 11,1. В побегах растений даже на самом загрязнённом участке № 5 содержалось сравнительно

Таблица 4
Содержание тяжёлых металлов в 25-суточных растениях ячменя (С, мг/кг), коэффициенты накопления растений

Участок	Орган	Pb			Cu			Ni			Zn		
		С	AK	KH	KБП	С	AK	KH	KБП	С	AK	KH	KБП
1	Корень	71±21	6,12	0,15	1,25	13±4	1,21	0,14	0,16	0,90	540±110	0,39	3,23
	Побег	11,6±3,5		0,02	0,14	10,7±3,2		0,11			186±37	0,13	0,73
2	Корень	14±5	1,78	0,33	4,39	8,1±2,4	0,49	0,31			54±13	0,53	7,04
	Побег	7,9±3,0		0,18	1,02	4,0±1,2		0,15			28±13	0,27	1,39
3	Корень	16±6	1,23	0,04	0,35	30±9	2,36	0,48			191±38	0,13	1,35
	Побег	13±4		0,03	0,19	12,7±3,8		0,20			135±27	0,09	0,25
4	Корень	36±11	1,89	0,03	0,20	65±13	6,57	0,65			1450±290	0,73	5,37
	Побег	19±6		0,02	0,11	9,9±3,0		0,10			66±13	0,03	0,23
5	Корень	118±35	5,13	0,03	0,23	79±16	3,76	0,13		2,19	1820±360	0,14	0,96
	Побег	23±7		0,01	0,04	21±6		0,03			164±33	0,01	0,07
6	Корень	28±11	1,56	0,45	1,68	5,9±1,8	0,43	0,25			72±25	0,43	1,47
	Побег	18±5		0,29	1,42	13,6±2,7		0,58			46±11	0,27	1,39
7	Корень	68±20	14,3	0,29	2,58	22±7	0,96	0,37			350±70	0,30	2,70
	Побег	4,7±1,9		0,02	0,12	23±5		0,39			64±13	0,05	0,35
8	Корень	16,5±7	3,00	0,19	0,96	10,4±3,1	1,03	0,26			460±90	0,57	4,00
	Побег	5,5±2,2		0,03	0,24	10,1±3,0		0,26			99±20	0,12	0,62

Примечание: С – содержание ТМ в растении, мг/кг сухой массы, AK – акропетальный коэффициент, KH – коэффициент накопления, KБП – коэффициент биологического поглощения, н/о – ниже предела обнаружения метода, «-» – расчёт невозможен, так как содержание ТМ в растении ниже предела обнаружения, жирным шрифтом выделены наибольшие значения.

небольшое количество элемента – 164 мг/кг, что свидетельствует о наличии барьера на уровне «корень – побег».

КН цинка растениями изменялся в пределах от 0,01 до 0,73, т. е. растения содержали элемент в меньшем количестве, чем почва. Расчётным путём определены КБП: они были выше или равны 1 для корней, но меньше 1 для побегов. Следовательно, для ячменя цинк – элемент сильного накопления ($10 > \text{КБП} \geq 1$) для корней и слабого – для побегов.

Таким образом, в ходе модельного эксперимента выявлено наибольшее содержание цинка и свинца в растениях ячменя, особенно на почвах участков с максимальным количеством данных элементов – №№ 4 и 5. Наибольшим накоплением ТМ отличаются корни растений: АК в большинстве случаев больше единицы. По сравнению с почвой корни содержали меньше ТМ ($\text{КН} < 1$). С увеличением содержания ТМ в почве увеличивалось содержание в корнях, однако при этом количество элементов в побегах мало изменялось, что свидетельствует о барьерной функции корней. Даже незначительная аккумуляция свинца (4 ПДК) и цинка (1,44 ПДК) в расчёте на сырую массу приводила к снижению накопления биомассы побегами растений (участок № 5). Согласно рассчитанным КБП свинец является элементом слабого накопления, а медь, никель и цинк – сильного, что подтверждается данными литературы. Однако эта закономерность не всегда соблюдалась: для свинца исключение

составили незагрязнённые участки, для меди – загрязнённый участок. Для цинка закономерность соблюдалась лишь для корней.

Влияние ТМ на почвенную микрофлору

Результаты количественного анализа почвенной микрофлоры показали, что численность любой из изучаемых групп МО в исследуемых образцах почвы колеблется в широком диапазоне (рис. 2). Для аммонифицирующих бактерий минимальная численность клеток зарегистрирована на участке № 5, где она составляет всего 8 тыс. КОЕ/г. Максимум отмечен на участке № 6 (1241 тыс. КОЕ/г). Абсолютное доминирование принадлежит грамположительным спорообразующим бактериям р. *Bacillus* (*B. mycooides*, *B. mesentericus*, *B. subtilis*). Во всех почвенных образцах, кроме образца с участка № 5, именно аммонификаторы преобладают над другими группами МО в количественном плане.

Высокий уровень загрязнения почвы ТМ приводит к подавлению развития азотфиксаторов (рис. 3). В этой группе бактерий минимальная численность так же, как и в случае с аммонификаторами, зарегистрирована на участке № 5 (всего 1,1 тыс. КОЕ/г). Максимальный показатель (92,2 тыс. КОЕ/г) зарегистрирован на участке № 3. Явными доминантами среди азотфиксаторов являются бактерии р. *Azotobacter*. Вероятно, это обусловлено тем, что на данном участке зарегистрировано максимальное содержание органического

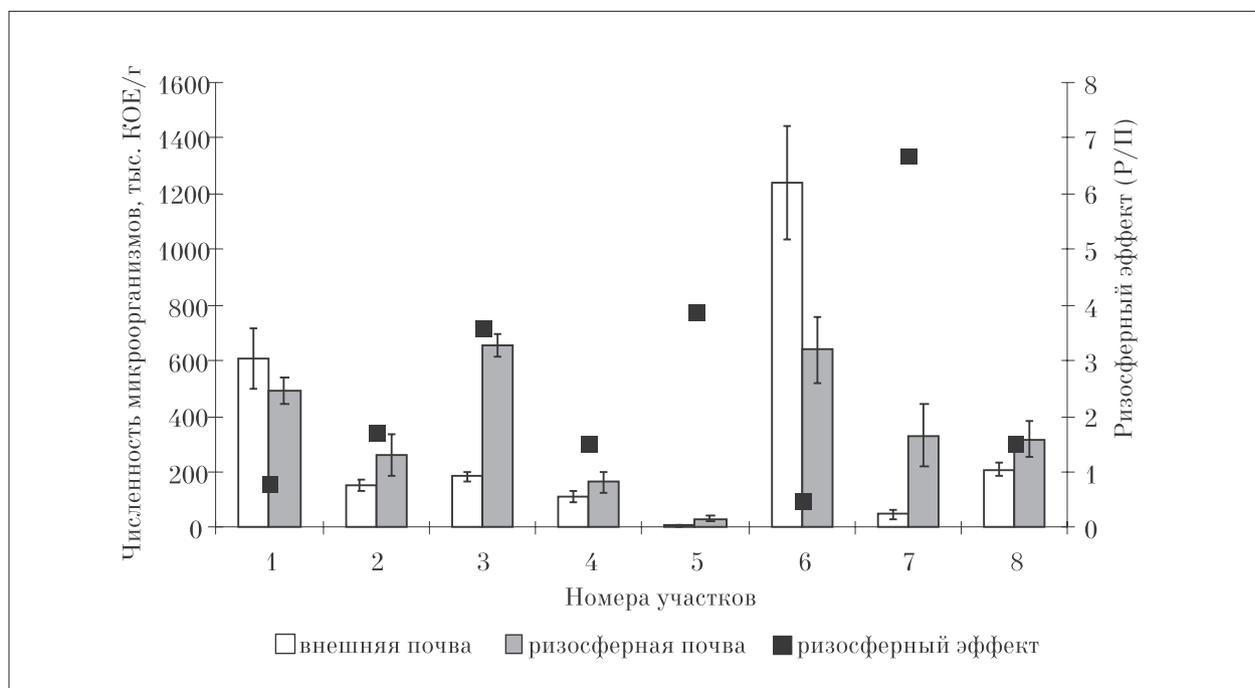


Рис. 2. Численность аммонифицирующих бактерий в почвах г. Владикавказа

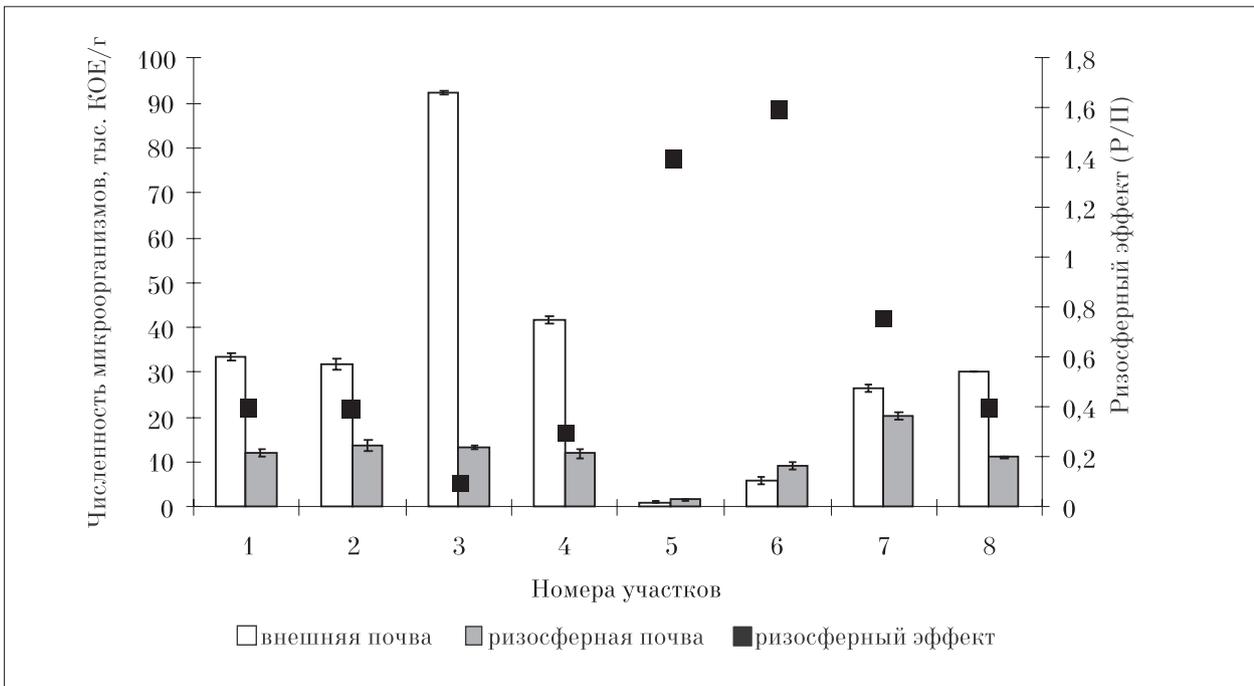


Рис. 3. Численность азотфиксирующих бактерий в почвах г. Владикавказа

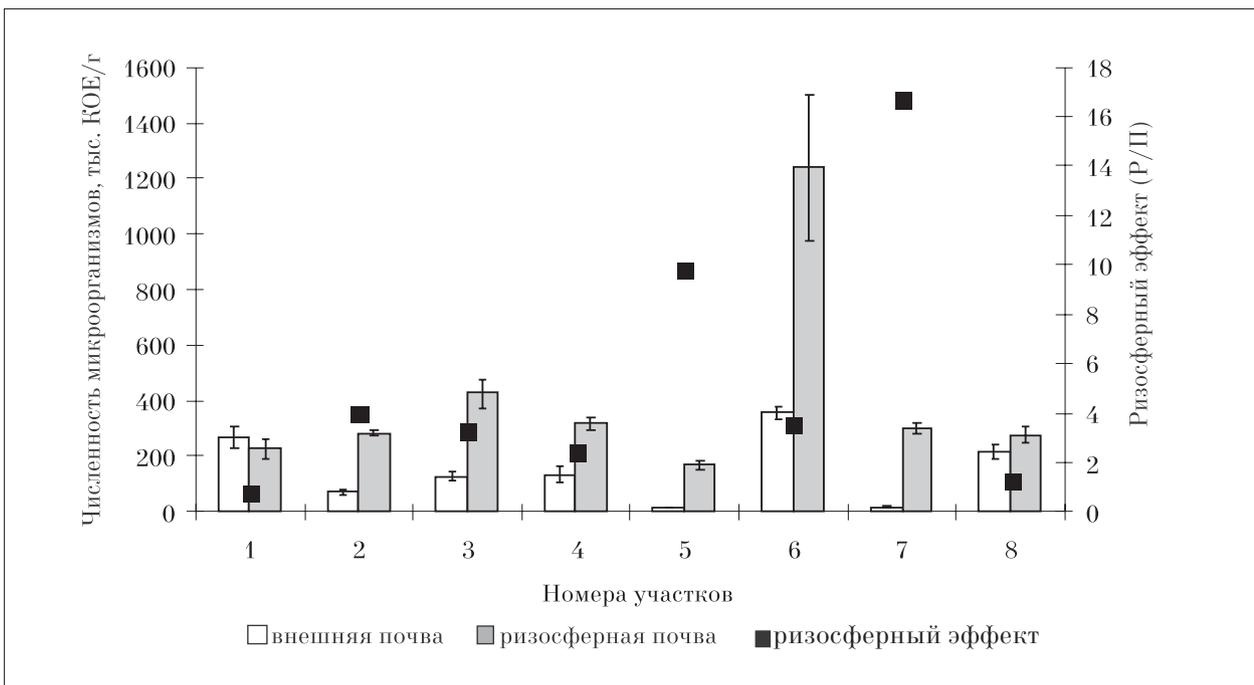


Рис. 4. Численность грибов в почвах г. Владикавказа

вещества (11,5%) и почва характеризуется нейтральной реакцией среды ($pH = 7,31$), т. е. условиями, благоприятствующими развитию азотфиксаторов. Отмечают, что дополнительное негативное действие на популяции азотобактера на загрязнённых свинцом почвах могут оказывать высокая кислотность и низкое содержание органического вещества [39].

Численность микромицетов невелика: от 17–18 тыс. КОЕ/г (участки №№ 5 и 6) до 357 тыс. КОЕ/г (участок № 7) (рис. 4). Примечательно, что минимальный уровень развития всех изучаемых групп МО: аммонификаторов, азотфиксаторов и грибов наблюдается на участке № 5, в котором при химическом анализе выявлены наивысшие концентрации

ТМ. Следовательно, даже такой вариабельный показатель, как численность микробных клеток, отражает наиболее высокий токсический эффект ТМ.

В то же время чёткой закономерности между концентрациями ТМ и численностью микробных популяций не выявлено.

Наличие в почве высших растений существенно меняет условия функционирования микробных комплексов. За счёт корневых выделений почва обогащается такими продуктами экзосмоса, как органические кислоты, сахара, аминокислоты. Именно поэтому ризосфера чаще всего является местом наиболее высокой микробиологической активности. Это положение частично оказалось справедливым при определении численности ризосферной микрофлоры в нашем опыте. Так, в ризосфере ячменя на всех участках, кроме участков №№ 1 и 6, была выше популяция гнилостных бактерий с величиной ризосферного эффекта от 1,5 до 6,7 (рис. 2). Практически не выражен этот показатель в группе азотфиксаторов (рис. 3). Только на двух участках (№№ 5 и 6) он немногим выше 1 (1,4–1,6). Существенные колебания величины ризосферного эффекта (от 0,8 до 16,7) отмечены для грибов (рис. 4). Полученные результаты показывают, что поведение МО в почве и ризосфере при загрязнении ТМ имеет более сложный характер, чем в незагрязнённых почвах.

Однако для аммонификаторов и грибов чётко прослеживается тенденция активизации развития в ризосфере, что свидетельствует о дополнительном снабжении этой группы МО органическим веществом за счёт высшего растения или о снижении в некоторой степени токсичности ТМ, находящихся в почве. Противоположная реакция азотфиксаторов, для которых ризосферный эффект в большинстве случаев не выражен, возможно, обусловлена конкуренцией за органический субстрат с аммонификаторами и грибами, численность которых в ризосфере в большинстве случаев, наоборот, возрастает.

Вероятно, при сильном химическом загрязнении почвы различными ТМ и поступлении их в клетки растений и МО могут наблюдаться явления антагонизма и синергизма ионов, что приводит к перераспределению ТМ в растении и оказывает разное влияние на основные группы почвенных МО.

Заключение

Результаты опытов показали, что выбросы ТМ (свинец, медь, никель и цинк) ОАО

«Электроцинк» (г. Владикавказ) приводят к высокому накоплению их в почве. Лишь один из восьми участков (№ 2), расположенный вдали от ОАО «Электроцинк», можно считать незагрязнённым ТМ. Почвы участков, расположенных вблизи источника загрязнения (участки №№ 4 и 5), имеют высокий и чрезвычайно высокий уровень загрязнения валовыми ($Z_{c(вал.)}$ равен 27 и 150) и подвижными формами свинца и цинка ($Z_{c(подв.)}$ равен 173 и 1174).

В модельном эксперименте установлено, что наибольшим накоплением цинка и свинца отличались растения, выращенные на почвах загрязнённых участков. Аккумуляция ТМ в корнях была выше, чем в побегах. По сравнению с почвой корни содержали меньше ТМ: $KH < 1$. С увеличением содержания ТМ в почве увеличивалось их содержание в корнях, однако при этом количество элементов в побегах мало изменялось, что свидетельствует о барьерной функции корней на пути проникновения избыточных количеств поллютантов в надземную часть. Так, при выращивании растений ячменя на почве загрязнённых участков №№ 4 и 5 содержание цинка в корнях составило 1450 и 1820 мг/кг, а в побегах было в 22 и 11 раз меньше – 66 и 164 мг/кг.

Как показал модельный эксперимент, даже незначительная аккумуляция побегами растений свинца (4 ПДК) и цинка (1,44 ПДК) в расчёте на сырую массу приводила к снижению накопления их биомассы в два с лишним раза. Согласно рассчитанным коэффициентам биологического поглощения для растений ячменя свинец является элементом слабого накопления, а медь, никель и цинк – сильного накопления.

Изучение особенностей развития микробных комплексов в ризосферной и внешней почве показало, что наиболее сильное влияние ТМ оказывают на азотфиксирующие бактерии. Ризосферный эффект в загрязнённой почве не проявляется так ярко, что обычно бывает характерным для незагрязнённых почв. Существенное подавление всех групп изучаемых микроорганизмов (аммонификаторов, азотфиксаторов, грибов) отмечено на участке № 5 с максимальным уровнем загрязнения почвы ТМ.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских учёных № МК-3964.2015.5.

Литература

1. Фёдорова Е.В., Одинцева Г.Я. Биоаккумуляция металлов растительностью в пределах малого аэротехно-

- генного загрязнения водосбора // Экология. 2005. № 1. С. 26–31.
2. Broos K., Mertens J., Smolders E. Toxicity of heavy metals in soil assessed with various soil microbial and plant growth assays: A comparative study // Environ. Toxicol. and Chem. V. 24. № 3. P. 634–640.
3. Горностаева Е.А., Злобин С.С., Сунцова Е.С., Елькина Т.С., Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я. Микробиологический статус почв в зоне действия Кирово-Чепецкого химического комбината // Теор. и прикл. экология. 2012. № 3. С. 44–49.
4. Дабах Е.В., Кондакова Л.В., Домрачева Л.И., Злобин С.С. Альго-микологическая оценка состояния почв в зоне влияния Кирово-Чепецкого химического комбината // Почвоведение. 2013. № 2. С. 187–194.
5. Фокина А.И., Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Горностаева Е.А., Огородникова С.Ю. Тяжёлые металлы как фактор изменения метаболизма у микроорганизмов (обзор) // Теор. и прикл. экология. 2015. № 2. С. 5–18.
6. Евдокимова Г.А. Почвенная микробиота как фактор устойчивости почв к загрязнению // Теор. и прикл. экология. 2014. № 2. С. 17–24.
7. Krumova E.T., Stoitsova S.R., Paunova-Krasteva T.S., Pashova S.B., Angelova M.B. Copper stress and filamentous fungus *Humicola lutea* 103 – ultrastructural changes and activities of key metabolic enzymes // Can J. Microbiol. 2012. V. 58. № 12. P. 1335–1343.
8. Jaroslawska A., Piotrowska-Seget Z. Lead resistance in microorganisms // Microbiology. 2014. V. 160. № 1. P. 12–25.
9. Лапыгина Е.П., Лысак Л.В., Бакулина Е.А., Звягинцев Д.Г. Устойчивость аутохтонных почвенных бактерий к шок-бицидным воздействиям // Почвоведение. 2006. № 11. С. 1363–1367.
10. Кондакова Л.В., Домрачева Л.И. Использование водорослей для биоконтроля состояния почвы при её химическом загрязнении // Водоросли: таксономия, экология, использование в мониторинге. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 294–299.
11. Свистова И.Д., Корецкая И.И., Талалайко Н.Н., Сенчакова Т.Ю. Биоразнообразие микромитозов чернозёма природных и антропогенных экосистем // Роль особо охраняемых природных территорий лесостепной и степной природных зон в сохранении и изучении биологического разнообразия. Матер. научно-практ. конф., посвящённой 80-летию Воронежского государственного природного биосферного заповедника, Воронеж, 17–21 сент. 2007. Волгоград, 2007. С. 87–89.
12. Муратова А.Ю. Растительно-микробные ассоциации в условиях углеводородного загрязнения: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Саратов, 2013. 48 с.
13. Горностаева Е.А. Влияние ионов меди и никеля на почвенные цианобактерии и цианобактериальные сообщества: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2015. 26 с.
14. Уткин А.А., Ефремова М.А. исследование особенностей синергизма и антагонизма тяжёлых металлов на примере свинца и кадмия в системе торфяная низинная почва – растение // Гумус и гумусообразование. Санкт-Петербург, 2004. С. 181–184.
15. Шведова Л.В., Чеснокова Т.А., Невский А.В. Миграция тяжёлых металлов в системе «почва – растение» // Инж. экология. 2004. № 6. С. 46–53.
16. Автухович И.Е. Индуцированная фиторемедиация травянистыми растениями грунта, загрязнённого свинцом // Докл. ТСХА. 2009. № 281. С. 136–139.
17. Панин М.С., Койгельдинова М.Т. Накопление цинка растениями видов *Trifolium hybridum* L., *Medicago sativa* L., *Brassica napus* L., *Avena sativa* L. из тёмно-каштановой почвы // Агрохимия. 2010. № 10. С. 59–67.
18. Yong E., Song G., Bian W., Zhang X. Impact of sewage amendment on heavy metal in soils of maize field // Agrochimica. 2010. V. 54. № 2. P. 115–128.
19. Буравцев В.Г., Ильинский А.В., Котова Е.А., Головатая Н.Н. Подбор растений для фиторемедиации почв, загрязнённых тяжёлыми металлами // Научно-технологические технологии в мелиорации: Материалы I Всерос. научно-исслед. конф. (Костяковские чтения). Москва, 2005. С. 282–285.
20. Геревич Т.С., Лялина Е.И., Горностаева Е.А., Кабалов З.В. Влияние предприятий г. Владикавказа на содержание тяжёлых металлов в объектах окружающей среды // Экология родного края: проблемы и пути их решения: Матер. Всерос. молодежной науч.-практ. конф. с международным участием. Киров, 2012. С. 195–198.
21. Зангелиди В.В. Влияние техногенного загрязнения на состояние почв г. Владикавказа: Дисс. канд. биол. наук. Владикавказ, 2009. 120 с.
22. Хубаева Г.П. Охрана окружающей среды утилизацией отходов горно-металлургического производства: дисс. канд. техн. наук. Владикавказ, 2004. 170 с.
23. Глазовская М.А. Геохимические основы типологии и методики исследований природных ландшафтов. М.: Изд-во Московского университета, 1964. 229 с.
24. Мотузова Г.В., Безуглова О.С. Экологический мониторинг почв. М.: Академический проект, 2007. 237 с.
25. ФР.1.31.2012.13573. Методика выполнения измерений массовых долей токсичных металлов в пробах почв атомно-абсорбционным методом. Москва, 2012. 16 с.
26. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Государственный комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. 8 с.
27. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: МГУ, 1970. 488 с.
28. Сборник методик выполнения измерений массовой концентрации ионов меди, свинца, кадмия, цинка, висмута, марганца, никеля и кобальта, методом вольтамперометрии на вольтамперометрическом анализаторе «Экотест-ВА». М.: НПП ООО «Эконикс-Эксперт», 2004. 61 с.
29. ГОСТ 26929-94. Сырьё и продукты пищевые. Подготовка проб. Минерализация для определения содержания токсичных элементов. М.: Стандартиформ, 2010. 12 с.

30. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.

31. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Негрусова. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 608 с.

32. Ревич Б.А., Саев Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. М.: ИМГРЭ, 1982. 112 с.

33. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве / Ревич Б.А., Саев Ю.Е., Смирнова Р.С. (Утв. 15 мая 1990 г. № 5174-90). М.: ИМГРЭ, 1990. 15 с.

34. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 15 с.

35. ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. 11 с.

36. СанПиН 42-123-4089-86. Предельно допустимые концентрации тяжёлых металлов и мышьяка в продовольственном сырье и пищевых продуктах. М.: 1986. 56 с.

37. Авессаломов И.А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов: Учебно-методическое пособие. М.: Изд-во Московского университета, 1987. 108 с.

38. Покровская С.Ф. Загрязнение почв тяжёлыми металлами и его влияние на сельскохозяйственное производство. М., 1986. 57 с.

39. Кураков А.В., Звягинцев Д.Г., Филип З. Изменение комплекса гетеротрофных микроорганизмов при загрязнении дерново-подзолистой почвы свинцом // Почвоведение. 2000. № 12. С. 1448–1456.

References

1. Fedorova Ye.V., Odintseva G.Ya. The bioaccumulation of metals in vegetation in the affairs of small watershed environmental contamination // *Ekologiya*. 2005. № 1. P. 26–31 (in Russian).

2. Broos K., Mertens J., Smolders E. Toxicity of heavy metals in soil assessed with various soil microbial and plant growth assays: A comparative study // *Environ. Toxicol. and Chem.* V. 24. № 3. P. 634–640.

3. Gornostayeva Ye.A., Zlobin S.S., Suntsova Ye.S., Yelkina T.S., Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya. The microbiological status of soils in the zone of Kirovo-Chepetsk Chemical Plant // *Teor. i prikl. ekologiya*. 2012. № 3. P. 44–49 (in Russian).

4. Dabakh Ye.V., Kondakova L.V., Domracheva L.I., Zlobin S.S. Algo-mycological assessment of soil condition in the zone of influence of Kirovo-Chepetsk Chemical Plant // *Pochvovedeniye*. 2013. № 2. P. 187–194 (in Russian).

5. Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Gornostayeva Ye.A., Ogorodnikova S.Yu. Heavy metals as a factor of changes in metabolism of microorganisms (review) // *Teor. i prikl. ekologiya*. 2015. № 2. P. 5–18 (in Russian).

6. Evdokimova G.A. Soil microbiota as a factor of soil resistance to pollution // *Teor. i prikl. ekologiya*. 2014. № 2. P. 17–24 (in Russian).

7. Krumova E.T., Stoitsova S.R., Paunova-Krasteva T.S., Pashova S.B., Angelova M.B. Copper stress and filamentous fungus *Humicola lutea* 103 – ultrastructural changes and activities of key metabolic enzymes // *Can J. Microbiol.* 2012. V. 58. № 12. P. 1335–1343.

8. Jaroslawska A., Piotrowska-Seget Z. Lead resistance in microorganisms // *Microbiology*. 2014. V. 160. № 1. P. 12–25.

9. Lapygina Ye.P., Lysak L.V., Bakulina Ye.A., Zvyagintsev D.G. Resistance of autochthonic soil bacteria to shock biocidal effects // *Pochvovedeniye*. 2006. № 11. P. 1363–1367 (in Russian).

10. Kondakova L.V., Domracheva L.I. The use of algae in biocontrol of state of chemically polluted soil // *Vodorosli: taksonomiya, ekologiya, ispolzovaniye v monitoringe*. Yekaterinburg: UrO RAN, 2011. P. 294–299 (in Russian).

11. Svistova I.D., Koretskaya I.I., Talalayko N.N., Senchakova T.Yu. Biodiversity of mikromycetes in black soil of natural and anthropogenic ecosystems // *Rol osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy lesostepnoy i stepnoy prirodnykh zon v sokhraneni i izuchenii biologicheskogo raznoobraziya*. Mater. nauchno-prakt. konf., posvyashchennoy 80-letiyu Voronezhskogo gosudarstvennogo prirodnogo biosfernogo zapovednika, Voronezh, 17–21 sent. 2007. Volgograd, 2007. P. 87–89 (in Russian).

12. Muratova A.Yu. Plant-microbial associations in terms of hydrocarbon contamination: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. Saratov, 2013. 48 p. (in Russian).

13. Gornostayeva Ye.A. Influence of copper and nickel ions on soil cyanobacteria and cyanobacterial communities: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. M., 2015. 26 p. (in Russian).

14. Utkin A.A., Yefremova M.A. Study of features of synergy and antagonism of heavy metals by the example of lead and cadmium in the system lowland peat soil – plant // *Gumus i gumusooobrazovaniye*. Sankt-Peterburg, 2004. P. 181–184 (in Russian).

15. Shvedova L.V., Chesnokova T.A., Nevskiy A.V. The migration of heavy metals in the system «soil – plant» // *Inzh. ekologiya*. 2004. № 6. P. 46–53 (in Russian).

16. Avtukhovich I.E. Induced herbaceous plants phytoremediation of soil contaminated with lead // *Dokl. TSKhA*. 2009. № 281. P. 136–139 (in Russian).

17. Panin M.S., Koygeldinova M.T. Accumulation of zinc by plants of the species *Trifolium-hybridum* L., *Medicago sativa* L., *Brassica napus* L., *Avena sativa* L. in dark chestnut soils // *Agrokimiya*. 2010. № 10. P. 59–67 (in Russian).

18. Yong E., Song G., Bian W., Zhang X. Impact of sewage amendment on heavy metal in soils of maize field // *Agrochimica*. 2010. V. 54. № 2. P. 115–128.
19. Buravtsev V.G., Ilinskiy A.V., Kotova Ye.A., Golovataya N.N. Science-intensive technologies in amelioration // *Materialy I Vseross. nauchno-issled. konf. (Kostyakovskiye chteniya)*. Moskva, 2005. P. 282–285 (in Russian).
20. Gerevich T.S., Lyalina Ye.I., Gornostayeva Ye.A., Kabaloyev Z.V. Influence of enterproses of Vladikavkaz on the content of heavy metals in the environment // *Ekologiya rodnogo kraya: problemy i puti ikh resheniya: Mater. Vseross. molodezhnoy nauch.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiyem*. Kirov, 2012. P. 195–198 (in Russian).
21. Zangelidi V.V. Influence of technogenic pollution on soil of Vladi-Caucasus: Diss. kand. biol. nauk. Vladikavkaz, 2009. 120 p. (in Russian).
22. Khubayeva G.P. Environmental disposal of mining and metallurgical industry waste: Diss. kand. tekhn. nauk. Vladikavkaz, 2004. 170 p. (in Russian).
23. Glazovskaya M.A. Geochemical basics of typology and methodology of studies of natural landscapes. M.: *Izd-vo Moskovskogo universiteta*, 1964. 229 p. (in Russian).
24. Motuzova G.V., Bezuglova O.S. Environmental monitoring of soil. M.: *Akademicheskij proyekt*, 2007. 237 p. (in Russian).
25. FR.1.31.2012.13573. Methods of measurement of mass fraction of toxic metals in soil samples by atomic absorption spectrometry. Moskva, 2012. 16 p. (in Russian).
26. GOST 26213-91. Soils. Methods for determination of organic substance. M.: *Gosudarstvennyy komitet standartizatsii i metrologii SSSR*, 1991. 8 p. (in Russian).
27. Arinushkina E.V. Manual on chemical analysis of soil. M.: *MGU*, 1970. 488 p. (in Russian).
28. The collection of methods of measurement of mass concentration of ions of cop-per, lead, cadmium, zinc, bismuth, manganese, nickel and cobalt, by voltammetry using vol-tammetric analyzer «Ecotest-VA». M.: *NPP OOO «Ekoniks-Ekspert»*, 2004. 61 p. (in Russian).
29. GOST 26929-94. Raw materials and food products. Sample preparation. Mineralization for determination of the content of toxic elements. M.: *Standartinform*, 2010. 12 p. (in Russian).
30. Glazovskaya M.A. Geochemistry of natural and man-made landscapes. M.: *Vyssshaya shkola*, 1988. 328 p. (in Russian).
31. Workshop on microbiology / Ed. A.I. Netrusov. M.: *Izdatelskiy tsentr «Akademiya»*, 2005. 608 p. (in Russian).
32. Revich B.A., Sayet Yu.E., Smirnova R.S., Sorokina E.P. Methodical recommendations on geochemical evaluation of contamination of towns with chemical elements. M.: *IMGRE*, 1982. 112 p. (in Russian).
33. Guidelines on assessment of the degree of atmospheric pollution with heavy metals judging from their content in snow cover and soil in settlements / Revich B.A., Sayet Yu.E., Smirnova R.S. (Utv. 15 maya 1990 g. № 5174-90). M.: *IMGRE*, 1990. 15 p. (in Russian).
34. Maximum permissible concentration (MPC) of chemicals in soil. Hygienic standards. M.: *Federalnyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora*, 2006. 15 p. (in Russian).
35. GN 2.1.7.2042-06. Approximate permissible concentration (APC) of chemicals in soil. Hygienic standards. M.: *Federalnyy tsentr gigiyeny i epidemiologii Rospotrebnadzora*, 2006. 11 p. (in Russian).
36. SanPiN 42-123-4089-86. Maximum allowable concentrations of heavy metals and arsenic in food raw materials and food products. M., 1986. 56 p. (in Russian).
37. Avessalomov I.A. Geochemical indicators in the study of landscapes: Teaching aid. M.: *Izd-vo Moskovskogo universiteta*, 1987. 108 p. (in Russian).
38. Pokrovskaya S.F. Soil pollution with heavy metals and its impact on agricultural production. M., 1986. 57 p. (in Russian).
39. Kurakov A.V., Zvyagintsev D.G., Filip Z. Changing of the complex of heterotrophic microorganisms in contaminated sod-podzolic soil // *Pochvovedeniye*. 2000. № 12. P. 1448–1456 (in Russian).