

На правах рукописи

**ДОРЖОНОВА ВИКТОРИЯ ОЛЕГОВНА**

**ФИТОЭКСТРАКЦИЯ И ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ  
МЕТАЛЛОВ В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВАХ**

**06.01.04 – агрохимия**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата биологических наук

Улан-Удэ  
2013

Работа выполнена в лаборатории биогеохимии и экспериментальной агрохимии ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

Научный руководитель: **Убугунов Леонид Лазаревич**, доктор биологических наук, профессор, директор, ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

Официальные оппоненты: **Абашеева Надежда Ефимовна**, доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН

**Коробова Елена Михайловна**, кандидат географических наук, ученый секретарь, ФГБУН Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

Ведущая организация: ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Защита состоится 27 декабря 2013 г. в 10-00 на заседании диссертационного Совета Д. 003.028.01 в ФГБУН Института общей и экспериментальной биологии Сибирского Отделения РАН по адресу: 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6; факс (3012) 433034; e-mail: [ioeb@biol.bscnet.ru](mailto:ioeb@biol.bscnet.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Бурятского научного центра СО РАН.

Автореферат разослан 26 ноября 2013 г. и размещен на официальном сайте института <http://igaeb.bol.ru> и в сети Интернет на официальном сайте ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации <http://vak2.ed.gov.ru>

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
канд. биол. наук



Л.Н. Болонева

## Введение

**Актуальность темы.** В современных условиях интенсивного технического развития общества природная среда подвержена комбинированному техногенному загрязнению. Среди большинства элементов и веществ, загрязняющих окружающую среду, по опасности воздействия на живые организмы и объему выбросов особое место занимают тяжелые металлы (ТМ) (Алексеев, 1987; Дятлов, 2000; Нейтрализация..., 2008).

Разработано множество приемов извлечения ТМ из почв. Среди них следует выделить технические, физические, химические и биологические методы, а также их комбинации (Минеев и др., 1981; Алексеев, 1987; Ильин, 1991; Обухов, Плеханова, 1995; Тяжелые..., 1997; Добровольский, 1999; Strivastava, Purima, 1998; Галиулин, Галиулина, 2003; Luo и др., 2006).

Как правило, эти методы весьма затратны, вследствие чего их использование сильно ограничено. В последние годы большое распространение получает метод извлечения ТМ с помощью растений (фитоэкстракция), а также с использованием химических добавок, повышающих доступность металлов растениям и, следовательно, увеличивающих вынос поллютантов из почв. Наиболее широко используемым хелатом является ЭДТА (Bucheli-Witschel, 2002; Grčman и др., 2003).

Подбор растений, способных экстрагировать большие количества ТМ, и оценка эффективности их использования при фитоэкстракции, актуальны и для Республики Бурятия, на территории которой имеются техногенно загрязненные районы. Одним из наиболее проблемных участков является г. Закаменск, на территории которого сосредоточены большие объемы техногенных, токсичных отходов горно-обогатительного производства.

**Цель исследований** – изучить возможность фитоэкстракции ТМ (Cd, Pb, Zn, Cu) с использованием растений и выявить наиболее информативные показатели фитотоксичности загрязненных почв.

### **Задачи исследований:**

1. Определить содержание ТМ в техногенных песках (ТП) и почвенном покрове г. Закаменск.
2. Изучить физико-химические и агрохимические свойства дерново-подбуря, серогумусовой и каштановой почв Западного Забайкалья.

3. Оценить на примере неодинаковых по биологическим особенностям культурных растений (горчицы, салата, овса, петрушки) возможность фитоэкстракции ТМ из загрязненной ТП серогумусовой почвы.

4. Определить возможность очистки серогумусовой почвы г. Закаменска от приоритетного и наиболее опасного элемента – кадмия с помощью ярутки лесной.

5. Выявить наиболее информативные показатели фитотоксичности загрязненных почв.

**Научная новизна.** Впервые на серогумусовой почве Юго-Западного Забайкалья выявлены виды растений, накапливающие ТМ при различных уровнях загрязнения почвы.

Установлено, что разные по биологическим особенностям культуры обладают неодинаковыми способностями фитоэкстракции ТМ из загрязненных почв. Между концентрациями ТМ в загрязненных почвах и их содержанием в органах растений отмечена положительная корреляционная связь, носящая линейный характер.

Выделены виды растений – потенциальных фитоэкстракторов, из которых ярутка лесная является аккумулятором кадмия из загрязненных почв. Наибольшая эффективность среди культурных растений в накоплении кадмия и свинца характерна для горчицы и овса.

Выявлены наиболее чувствительные индикаторные параметры, которые могут быть использованы при оценке фитотоксичности дерново-подбуров и каштановых почв. Оценен потенциал различных видов растений при очистке загрязненных ТМ почв в почвенно-климатических условиях горной тайги, что позволяет подбирать культуры или ряд культур для фитоэкстракции приоритетных металлов.

**Теоретическая и практическая значимость.** Выявленные закономерности накопления и распределения ТМ в разных видах растений при различных уровнях загрязнения почв вносят теоретический вклад в знания о поведении ТМ в системе почва-растение и создают научную основу для оценки видов растений по толерантности к приоритетным токсичным элементам и способности их аккумуляции фитомассой.

Результаты исследования могут быть полезны природоохранным службам Республики Бурятия для мониторинга эколого-биогеохимического состояния почвенно-растительного покрова г. Закаменск. В настоящее время материалы диссертации используются в курсах «Проблемы загрязнения и ремедиации почв» и «Химическое загряз-

нение почв и методы детоксикации» у магистрантов по направлению «Агрохимия и агропочвоведение» Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова.

#### **Защищаемые положения:**

1. По показателю суммарного геохимического загрязнения ( $Z_c$ ), состояние почвенного покрова большей части территории г. Закаменска оценивается как опасное, на отдельных участках – чрезвычайно опасное.

2. Уровень фитоэкстракции ТМ тест-культурами (салат, горчица, овес, петрушка, ярутка лесная) определяется их биологическими особенностями и зависит от степени загрязнения почвы.

3. Фитотоксичность почв проявляется в ингибировании и (или) стимулировании развития проростков пшеницы в зависимости от концентрации элементов (Cd, Pb) и сроков их взаимодействия с почвой.

**Апробация работы.** Результаты исследований были доложены и обсуждены на международных: «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде» (Семей, 2010), «Современные проблемы загрязнения почв» (Москва, 2010 г.), «Фундаментальные и инновационные аспекты биогеохимии (Астрахань, 2011), «Разнообразие почв Северной и Центральной геохимии» (Улан-Удэ, 2011); всероссийской «Оптимизация агрохимических свойств и продукционных процессов в горно-степных экосистемах» (Улан-Удэ, 2010); региональных конференциях: «Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности) и проблемы природопользования» и симпозиума «Геоэкологические, экономические и социальные проблемы природопользования» (Чита, 2011).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях рекомендуемых ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка цитируемой литературы и 24 приложений. Работа содержит 142 страницы машинописного текста, включает 14 таблиц, иллюстрирована 27 рисунками. Список цитируемой литературы включает 213 источников, в том числе 49 на иностранных языках.

**Личный вклад автора.** Соискатель непосредственно участвовала в закладке почвенных разрезов, отборе почвенных и растительных образцов, химико-аналитических работах. Автором самостоятельно были проведены вегетационные и лабораторные опыты по фитоэкстракции и

фитотоксичности ТМ в загрязненных почвах в 2007-2011 гг. Проведена обработка, анализ полученного материала и подготовка публикаций.

### **Глава 1. Тяжелые металлы: геохимическая характеристика, содержание в почвах и растениях, методы детоксикации и очистки загрязненных почв (обзор литературы)**

В главе на основании анализа отечественной и зарубежной литературы приводится краткая геохимическая характеристика содержания изученной группы элементов в почвах и растениях, а также приемы детоксикации и очистки загрязненных почв от тяжелых металлов.

### **Глава 2. Объекты и методы исследований**

**Фитоэкстракция тяжелых металлов из загрязненной техногенными песками серогумусовой почвы.** Vegetационные опыты были заложены по методу З.И. Журбицкого (1968) на серогумусовой почве. В качестве посевных культур использовались петрушка листовая, салат посевной, горчица белая (сорт Радуга) и овес посевной (сорт Саян). Vegetационные опыты проводились в сосудах емкостью 0,5 л. Для моделирования различных условий загрязнения, в почву (II) добавляли техногенный песок (III) в разных соотношениях. После внесения ТП, почву в сосудах тщательно перемешивали и выдерживали в течение 30 суток, по завершению осуществляли посев семян культур. Уборка растений проводилась через 30 дней. Влажность почвы поддерживалась на уровне 60 % от ПВ. Схема опытов: 1) П; 2) П+ТП – 3:1; 3) П+ТП – 2:1; 4) П+ТП – 1:1; 5) П+ТП – 1:3; 6) П+ТП – 1:2; 7) ТП. Повторность опыта 4-кратная.

**Фитоэкстракция Cd из загрязненной серогумусовой почвы.** Опыты проводились в сосудах емкостью 10 л. В качестве посевной культуры использовали ярутку лесную (*Thlaspi caerulescens*). В почву вносили возрастающие дозы кадмия (Cd) в виде водного раствора уксуснокислой соли и 3 ммоль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА)/кг почвы. После внесения Cd и ЭДТА, почва в сосудах тщательно перемешивалась и выдерживалась в течение 1 месяца и 1 года, соответственно схеме опыта (табл. 1), по завершению осуществляли посев семян. Уборка растений проводилась через 30 дней. Влажность почвы поддерживалась на уровне 60 % от ПВ. Повторность опыта 4-кратная.

Таблица 1.Схема опыта

Доза кадмия, мг/кг почвы		Доза кадмия, мг/кг почвы	
1 месяц		1 год	
Варианты		Варианты	
0 (контроль)	ЭДТА 3 ммоль/кг – фон	0 (контроль)	ЭДТА 3 ммоль/кг – фон
1 мг Cd /кг почвы	Фон + 1 мг Cd /кг почвы	1 мг Cd /кг почвы	Фон + 1 мг Cd /кг почвы
5 -"-	Фон + 5 -"-	5 -"-	Фон + 5 -"-
10 -"-	Фон + 10 -"-	10 -"-	Фон + 10 -"-
50 -"-	Фон + 50 -"-	50 -"-	Фон + 50 -"-
100 -"-	Фон + 100 -"-	100 -"-	Фон + 100 -"-
200 -"-	Фон + 200 -"-	200 -"-	Фон + 200 -"-
500 -"-	Фон + 500 -"-	500 -"-	Фон + 500 -"-

**Фитотоксичность кадмия и свинца** изучали в лабораторном опыте на дерново-подбуре и для сравнения на каштановой почве. Культура – яровая пшеница сорта Бурятская 79. Опыты проводились в сосудах емкостью 0,3 л. Для моделирования необходимого уровня загрязнения в почвы вносили элементы в виде водного раствора уксуснокислой соли свинца и кадмия из расчета на действующее вещество по схеме (табл.2).

Таблица 2. Схема опыта

Вариант	Доза кадмия, мг/кг почвы	Вариант	Доза свинца, мг/кг почвы
1	0 (контроль без внесения Cd)	1	0 (контроль без внесения Pb)
2	40	2	50
3	80	3	100
4	160	4	200
5	320	5	400
6	640	6	800
7	1250	7	1600
8	2500	8	3200

Для сравнения уровней фиксации их почвой внесенные элементы выдерживали в почве в течение 7 и 30 суток. Уборка растений проводилась после 14 дней. Влажность почвы поддерживалась на уровне 60 % от ПВ. Повторность опыта 4-кратная. Для оценки влияния загрязнения почв элементами использовались следующие показатели: всхо-

жесть, энергия, дружность и продолжительность прорастания (Гриценко, Калошина, 1984). Оценку воздействия металлов на интенсивность начального роста пшеницы определяли по изменениям длины и массы корней и зеленых проростков. О токсичности почв судили по разнице показателей между незагрязненной (контрольной) почвой и вариантами опыта с внесением элементов.

**Методы исследования почв и растений.** Физико-химические свойства почв изучали общепринятыми методами исследований (Аринушкина, 1970; Агрохимические..., 1975; Ринькис и др., 1987), определение pH водной вытяжки – потенциометрическим методом, содержание гумуса – по методу Тюрина в модификации Никитина, подвижный фосфор и обменный калий по Мачигину и Кирсанову, емкость катионного обмена – по методу Бобко-Аскинази, гранулометрический состав – по Качинскому, количество карбонатов – при помощи кальциметра по Ринькису. Для определения валового содержания ТМ в почве пробы подвергались полному разложению концентрированными кислотами. Конечное определение элементов проводили на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Квант-2а» с дейтериевой коррекцией фона (г. Новосибирск).

Растительные образцы после сухого озоления растворяли в разбавленной соляной кислоте. В растительных пробах определяли содержание ТМ атомно-абсорбционным методом на спектрометре AAnalyst 400 Perkin Elmer (Методические..., 1982; Практикум..., 2001).

Буферность почвы по отношению к ТМ оценивали по методике В.Б. Ильина (1995) в слое почвы 0-20 см. Эколого-агрохимическое нормирование содержания ТМ в почвах проводили по Н.Г. Зырину (1985). Вариационно-статистическую обработку полученных данных выполняли по Б.А. Доспехову (1979). Для оценки степени химического загрязнения территории отходов обогащения Джидинского вольфрамомолибденового комбината использовали комплексный геохимический показатель загрязнения  $Z_c$ , который рассчитывали по формуле:  $Z_c = \sum K_c - (n-1)$ , где  $K_c$  – коэффициент аномального содержания ( $C_a$ ) относительно его фонового содержания ( $C_f$ ):  $K_c = C_a/C_f$ ,  $n$  – число аномальных элементов с  $K_c \geq 1,5$  (Методические ..., 2004).

### **Глава 3. Основные свойства и буферность почв по отношению к тяжелым металлам.**

**Природно-климатические условия района проведения исследований.** По литературным источникам приведена характеристика природно-климатических условий почвообразования.

**Техногенное загрязнение городской и пригородной зон г. Закаменск отходами Джидинского вольфрамо-молибденового комбината** – бывшего градообразующего предприятия. За время его функционирования было создано два крупных хвостохранилища отходов производства – техногенных песков, общий объем которых составляет более 40 млн. т. Помимо площадей, непосредственно покрытых отходами, активно загрязняются и сопредельные территории, включая г. Закаменск (Яценко, 1994; Смирнова и др., 2005).

В целях оценки современного уровня загрязнения почвенного покрова были проведены биогеохимические обследования в г. Закаменск, по данным которых установлено, что приоритетными загрязнителями на изученной территории являются Cd, Pb, Zn, Cu, W, Mo, As и Sb. Превышение ПДК ТМ в хвостах достигает 100 и более раз. Согласно показателю суммарного геохимического загрязнения ( $Z_c$ ), состояние почвенного покрова большей части территории оценивается как опасное ( $Z_c$  варьирует в диапазоне 32-128). На отдельных участках, приуроченных к источникам загрязнения, фиксируются значения  $Z_c$ , превышающие 128-4000, их состояние характеризуется как чрезвычайно опасное (рис. 1). Такая ситуация сложилась за счет рассеивания техногенных песков, содержащих высокие количества тяжелых металлов, многократно превышающих ПДК, по почвенному покрову пригорода и самого города (табл. 3).

Таблица 3. Содержание ТМ в серогумусовой почве и техногенных песках (ТП), мг/кг

Объект	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr
Серогумусовая почва	0,5	11	83	26	26	20	391	57
ТП	42	7500	3160	620	34	44	121	70
ПДК (ОДК)	0,5	32	110	33	35	50	1500	90

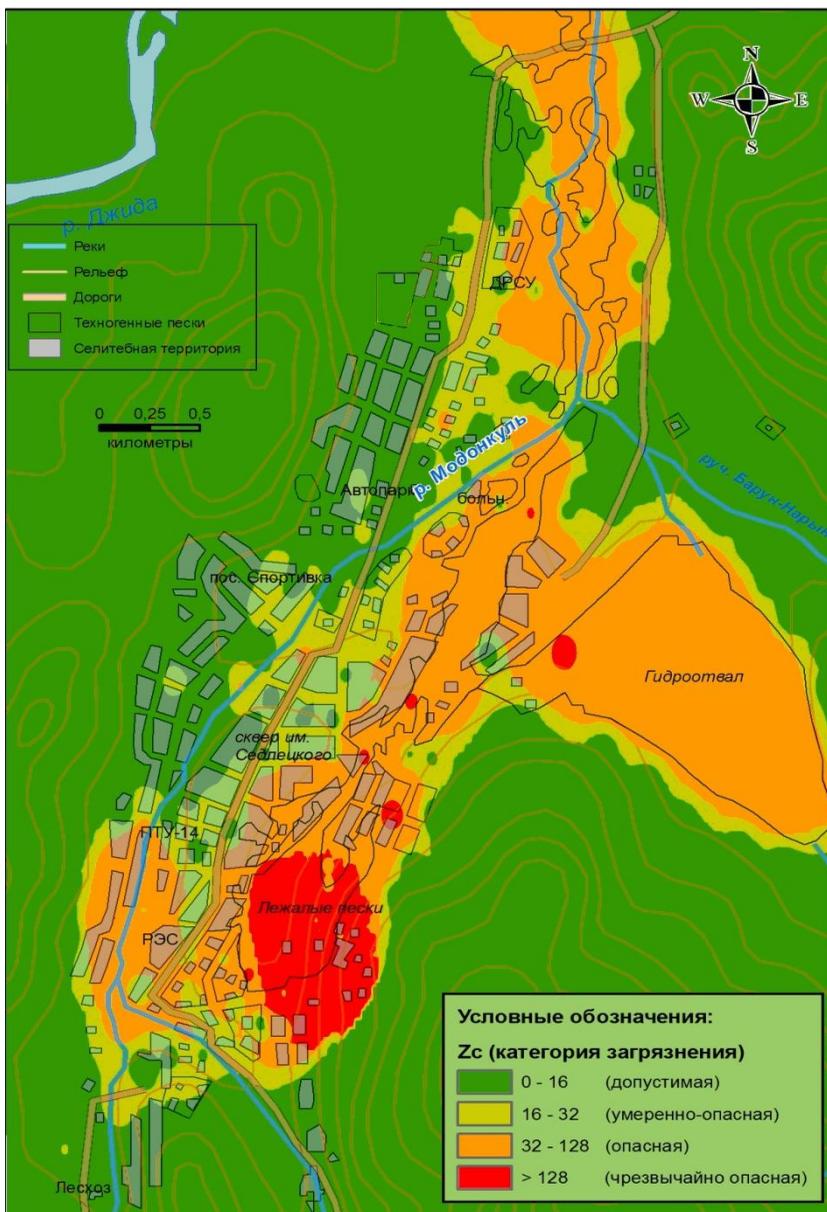
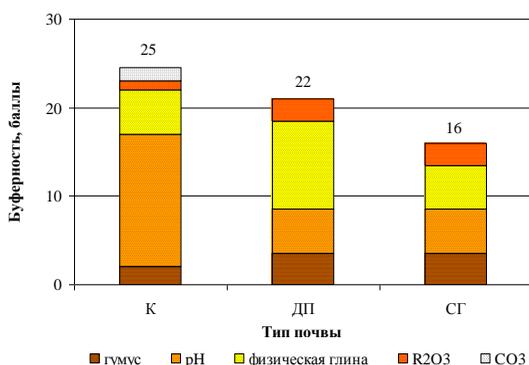


Рис. 1. Суммарное загрязнение ТМ почвенного покрова г. Закаменска

**Буферность дерново-подбура, серогумусовой, каштановой почв по отношению к тяжелым металлам.** Исходя из физико-химических свойств (реакция среды, содержание гумуса, количество полуторных оксидов, карбонатов, тонкодисперсных частиц), рассчитана буферность почв к загрязнению тяжелыми металлами. Установлено, что в инактивации избыточных ионов ТМ в каштановой почве значительная доля принадлежит реакции среды, в дерново-подбуре – содержанию физической глины, в серогумусовой – реакции среды и количеству физической глины. Дерново-подбур и каштановая почвы обладают средней буферностью, серогумусовая – низкой (рис. 2).



**Рис. 2. Буферность почв по отношению к тяжелым металлам**  
Усл. обозн.: К – каштановая почва; ДП – дерново-подбур;  
СГ – серогумусовая почва

#### **Глава 4. Фитоэкстракция тяжелых металлов из загрязненной серогумусовой почвы**

Фитоэкстракция – использование естественных растений, способных накапливать металлы в надземных органах, и определенных обработок почвы для переноса элемента-загрязнителя в их надземные части, которые затем утилизируются (Алексеев, 1987; Обухов, Плеханова, 1995; Галиулин, Галиулина, 2003; Luo и др., 2006).

**Фитоэкстракция тяжелых металлов из загрязненной техногенными песками серогумусовой почвы** с использованием показателей длины, биологической продуктивности, концентрации ТМ в биомассе растений и выноса ТМ их фитомассой.

**Длина растений.** В начальные периоды роста (первые 10 суток вегетации) длина растений на всех, в т.ч. загрязненных ТП вариантах,

варьировала в небольшом интервале. В этот период фитотоксичного действия ТП на растения не выявлено, даже было отмечено некоторое положительное влияние небольших количеств ТП на длину корней и надземной части проростков культур, что проявилось в увеличении их линейных размеров.

Максимальное стимулирующее действие ТП зафиксировано при соотношении П:ТП=3:1 и выразилось в увеличении длины надземной части: для петрушки – на 116%, салата – 107, овса – 154%; корней – на 107%, 147 и 141% от контроля соответственно. У растений горчицы наибольший стимулирующий эффект отмечен при количестве ТП в почве 33% и составил для надземной части 117%, а корней 132% от контроля. По мере увеличения доли ТП в почве эти показатели снижались.

В варианте ТП (без почвы), растения петрушки и салата не всходили, а семена горчицы прорастали, но проростки полностью погибали через 4-5 суток после всходов. Устойчивость растений овса оказалась заметно выше, семена прорастали и продолжали расти до окончания опыта. Однако проростки обесцвечивались, темнели, утончались и скручивались как по ширине, так и по длине. Это связано с тем, что техногенные пески имели высокотоксичные концентрации многих ТМ.

**Биологическая продуктивность.** Биологическая продуктивность, как и длина растений, значительно изменялась в зависимости от соотношения почвы и ТП, а также вида растения.

Фитотоксичное действие смеси (снижение урожайности на 10 и более %) для горчицы было отмечено при содержании ТП в смеси 25 %, салата – 33%; петрушки – 67 %. При 25 % ТП для петрушки и при 67% для овса отмечалось увеличение надземной и корневой фитомассы в 1,2 и 2,2 раза по сравнению с контролем. Стимулирующее действие ТП в небольших долях зависело, прежде всего, от видовых особенностей культур. При этом, чем выше была толерантность растений, тем сильнее проявлялся стимулирующий эффект.

**Концентрация ТМ в фитомассе растений.** Изучалось накопление и вынос тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn и Cu), содержание которых многократно превышало их ПДК (ОДК) в почве.

Несмотря на разнообразное варьирование биопродуктивности растений, накопление ТМ в надземной части и корнях было вполне закономерным. Отмечалось увеличение содержания ТМ в растениях при возрастании доли ТП в смеси. Причем большая часть их накапливалась

в корнях, меньшая – в надземной части. Исследуемые в опыте культуры обладали избирательной способностью к накоплению отдельных ТМ: вид и уровень загрязнения оказали существенное влияние на поступление из почвы избытка элементов-загрязнителей.

**Вынос ТМ фитомассой растений.** Вынос ТМ растениями различался в зависимости от доли ТП, специфики элемента и вида растения. С увеличением ТП в смеси в большинстве случаев возрастал вынос ТМ. Кривые выноса имели вид, близкий к линейному или нелинейный.

**Кадмий.** Увеличение доли ТП в смеси приводило к резкому увеличению выноса кадмия по отношению к контролю. Зависимость выноса элемента всеми культурами была близка к прямолинейной. Видовые различия растений по отношению к Cd отчетливо не проявились.

Вынос кадмия растениями по всем вариантам опыта происходил интенсивнее надземной частью, чем корнями. Общей закономерностью явилось то, что при малых долях ТП (25-33%) в смеси вынос был практически одинаковым на уровне 0,02-0,03 мг/м<sup>2</sup>, с повышением количества ТП (50-75%) вынос увеличился до 0,05-0,11 мг/м<sup>2</sup> (рис. 3).

По величине выноса кадмия растения располагались в следующий ряд: овес > горчица > петрушка > салат.

**Свинец.** Надземная часть растений более интенсивно, чем корни, накапливала свинец, вынос которого варьировал от 0,01-0,62 мг/м<sup>2</sup> (рис. 4). Общий вынос свинца растениями значительно изменялся в зависимости от величины соотношения ТП и почвы, а также от вида растений. По интенсивности выноса Pb растения располагались следующим образом: овес > петрушка > горчица > салат.

**Цинк.** Вынос цинка петрушкой, горчицей, овсом и салатом по всем вариантам опыта происходил интенсивнее надземной частью, чем корнями. Отличительной особенностью явилось, то, что вынос растениями петрушки и салата имели приближенные значения по всем вариантам опыта, в том числе и контроля. Максимальный вынос Zn отмечен у горчицы при содержании техногенного песка 25 и 33% и составил соответственно 6,88 и 6,52 мг/м<sup>2</sup>, минимальный – у петрушки и салата.

**Медь.** Внесение ТП привело к увеличению выноса меди растениями по отношению к контролю. Петрушка оказалась более чувствительной к небольшим дозам: вынос по отношению к контролю возрос более чем в 2 раза, а затем стал постепенно снижаться, сравнявшись при более высоких количествах ТП с выносом данного элемента культурой салата.

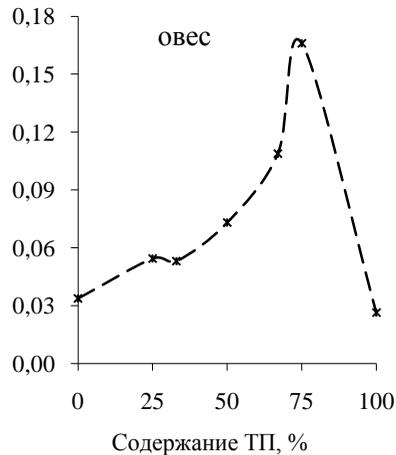
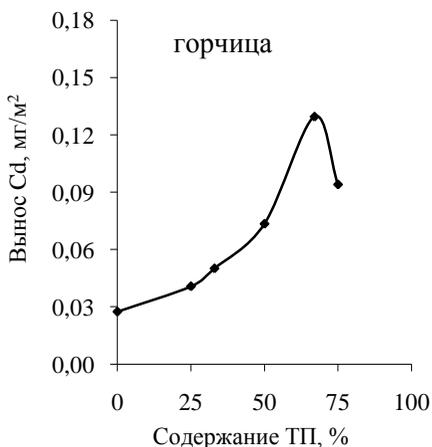
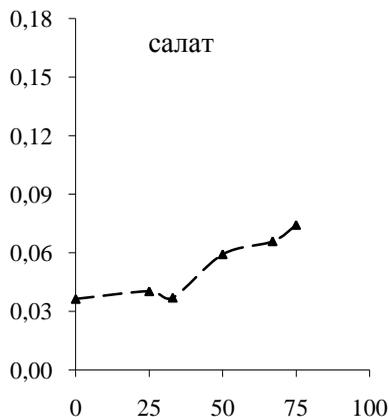
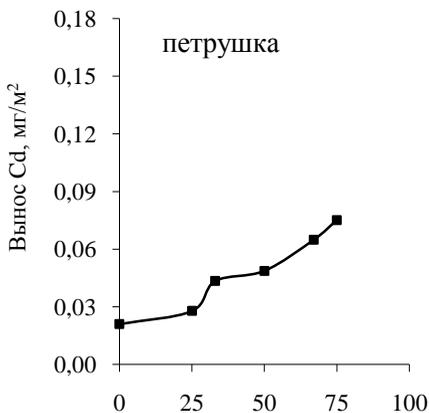


Рис. 3. Общий вынос Cd опытными культурами в зависимости от содержания ТП в почве, мг/м<sup>2</sup>

Вынос меди растениями, как и других элементов, происходил интенсивнее надземной частью, чем корнями, и варьировал в пределах от 0,26-0,85 мг/м<sup>2</sup>. В условиях загрязнения почвы техногенным песком наибольший вынос Cu отмечен у овса, промежуточные позиции заняли в убывающем порядке петрушка и салат и наименьшая величина выноса была характерна для горчицы.

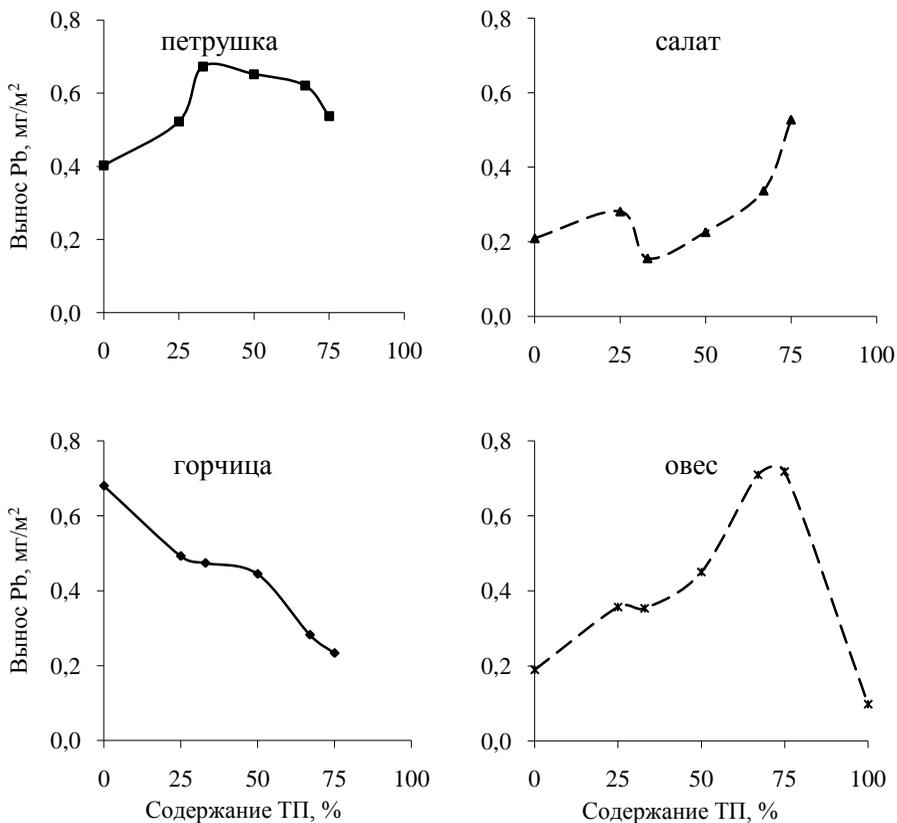


Рис. 4. **Общий вынос Pb опытными культурами в зависимости от содержания ТП в почве, мг/м<sup>2</sup>**

Общий вынос меди растениями значительно изменялся в зависимости от вида растений и в большей степени от процентного соотношения ТП и почвы. Максимальный суммарный вынос установлен у растений овса на уровне 1,02 мг/м<sup>2</sup>, при доле ТП 50%, что практически в 2,0 раза превысило значения контрольного варианта.

Таким образом, для очистки почв загрязненных техногенными песками наиболее эффективными являются горчица и овес с преимущественным накоплением Zn и Cd, петрушка – Pb. Салат характеризовался низкими значениями выноса ТМ по сравнению с другими культурами.

**Фитоэкстракция кадмия из загрязненной серогумусовой почвы. Длина растений.** Внесение возрастающих доз кадмия существенно

влияло на рост растений и продуктивность ярутки лесной: установлено достоверное снижение длины и массы растений.

Результаты исследований показали также большую роль длительности взаимодействия Cd с почвой. Так, при 365-дневном сроке токсичное его действие заметно ослабло, снижение длины и урожайности происходило меньшими темпами и существенно превосходило соответствующие показатели 30-дневного срока взаимодействия. Дозы 200 и 500 мг/кг, приведшие к гибели растений при коротком сроке, не оказали летального действия при длительном взаимодействии Cd с почвой.

**Биологическая продуктивность.** Различные концентрации кадмия в почвах существенно влияли на массу сухого вещества ярутки лесной. Увеличение содержания кадмия от 1 до 100 мг/кг почвы вызывало резкое снижение массы побегов и корней, а при 200 и более мг/кг – растения не всходили. Дозы Cd от 1 до 10 мг/кг не только не оказали токсичного влияния на растения, а напротив, стимулировали накопление фитомассы по сравнению с контролем.

**Концентрация кадмия в фитомассе.** Увеличение концентрации кадмия в почве привело к значительному повышению содержания лантанного элемента в ярутке лесной. При дозе Cd 0-10 мг/кг большее количество элемента накапливалось надземной частью, а при дозе 50-500 мг/кг – корнями. Эта разница возрастала с увеличением доз Cd.

**Вынос кадмия** яруткой лесной происходил интенсивнее надземной частью, чем корнями при дозах кадмия 1-50 и 1-100 мг/кг при 30 и 365 сутках взаимодействия, соответственно (табл. 4). При дальнейшем увеличении доз кадмия вынос его как надземной частью, так и корнями снижался. Общий вынос значительно изменялся в зависимости, как от доз кадмия, так и от длительности его взаимодействия с почвой.

Несмотря на невысокие показатели выноса кадмия, целесообразность использования ярутки лесной в качестве фитоэкстрактора очевидна. Принимая во внимание то, что содержание кадмия в почвах г. Закаменск не превышает 10 мг/кг и согласно расчетным данным по выносу, требуется от 2 до 10 урожаев общей фитомассы для практически полной очистки почв от кадмия. В реальности количество урожаев может быть и меньшим, т.к. в ходе фитоэкстракции будет извлечена наиболее биодоступная и экологически опасная часть соединений кадмия.

Таблица 4. Вынос Cd надземной и подземной фитомассой ярутки лесной в зависимости от его концентрации и срока взаимодействия с почвой

Концентрация Cd в почве, мг/кг	Вынос кадмия, мг/м <sup>2</sup>			Содержание Cd в почве в прикорневой зоне, мг/м <sup>2</sup>	% Cd выносимый урожаем	Количество урожая, необходимое для очистки почвы
	надземная часть	корни	общий			
1 месяц						
0 (контроль)	0,11	0,03	0,14	0,2	73	–
1	0,78	0,04	0,82	2,1	39	2,5
5	1,58	0,07	1,65	9,7	17	5,9
10	1,85	0,12	1,97	19,1	10	9,7
50	1,5	0,55	2,05	94,9	2	46,2
100	0,56	0,34	0,9	189,6	0	210,9
200	–	–	–	379,0	–	–
500	–	–	–	947,2	–	–
1 год						
0 (контроль)	0,11	0,02	0,13	0,2	69	–
1	1,35	0,15	1,5	2,1	72	1,4
5	5,51	0,38	5,89	9,7	61	1,6
10	9,53	0,71	10,24	19,1	54	1,9
50	10,7	1,53	12,24	94,9	13	7,8
100	10,62	2,31	12,92	189,6	7	14,7
200	8,75	2,11	10,86	379,0	3	34,9
500	4,54	1,69	6,23	947,2	1	152,1

**Внесение ЭДТА.** После добавления ЭДТА в почву, как и в случае с внесением кадмия, это соединение выдерживалось в течение 30 и 365 суток. Несмотря на длительные сроки его экспозиции в почве, семена не взошли ни в одном из вариантов опыта, что свидетельствует об отсутствии эффективности его применения на серогумусовых почвах.

**Сроки взаимодействия металла с почвой.** Токсичное действие кадмия заметно ослабло при более длительном сроке взаимодействия металла с почвой. Особенно ярко это проявилось при дозах 200 и 500 мг/кг: если после 1 месяца взаимодействия семена не прорастали, то после 1 года были получены жизнеспособные всходы.

В интервале доз Cd 1-100 мг/кг фитомасса ярутки лесной повысилась от 1,5 до 6,4 раз. Таким образом, анализ литературных и полученных нами данных показал, что в незначительных концентрациях кадмий может стимулировать увеличение биопродуктивности растений.

## Глава 5. Оценка фитотоксичности кадмия и свинца в дерново-подбуре и каштановой почве

Токсичность почвы – снижение показателей, снимаемых с тест-объекта на исследуемой почве, по сравнению с контролем (Вальков и др., 1997). Нами было изучено влияние возрастающих доз кадмия и свинца на токсичность дерново-подбуря и каштановой почвы по отношению к яровой пшенице.

**Фитооценка почв по всхожести и энергии прорастания семян пшеницы.** При внесении в почву кадмия было отмечено статистически значимое снижение всхожести семян пшеницы при дозах 80 мг/кг в каштановой почве и 320 мг/кг – в дерново-подбуре. При увеличении срока взаимодействия почв токсичность Cd уменьшилась, а отрицательное влияние элемента на всхожесть было отмечено при дозах 160 и 320 мг/кг, соответственно. Дальнейшее увеличение концентраций элемента в почвах приводило к усыханию и гибели семян.

Токсичное действие свинца было выражено в меньшей степени, согласно полученным результатам, при внесении Pb в дозе 1600 мг/кг при 7 сутках выдерживания каштановой почвы, растения не всходили, а при 30 сутках семена хоть и проросли, но проростки полностью погибали через 8-9 суток после всходов. В варианте с внесением дозы Pb 3200 мг/кг, всхожесть отсутствовала вообще. В опыте с дерново-подбуром, существенное снижение всхожести семян (82% от контроля) и энергии прорастания (68% от контроля) отмечено только в случае применения самой высокой дозы (3200 мг/кг) при 7 сутках взаимодействия. При 30 сутках всхожесть зерен на данном варианте заметно улучшилась (до 95% от контроля), а энергия прорастания не отличалась от контрольного варианта.

**Фитооценка почв по дружности и продолжительности прорастания семян пшеницы.** Возрастающие дозы Cd и Pb на каштановой почве приводили к резкому снижению дружности всходов и значительному увеличению продолжительности прорастания. Снижение зависело, прежде всего, от типа почв и в меньшей степени от сроков их взаимодействия с элементами. В опыте на дерново-подбуре наблюдалось существенное стимулирование дружности и несколько меньшее – продолжительности прорастания семян при невысоких дозах. Увеличение срока взаимодействия до 30 суток усилило этот эффект при небольших дозах элементов и заметно снизило токсичное действие более высоких, особенно на каштановой почве. Кроме того, отмечено усиление

ние стимулирующего влияния элементов на дерново-подбуре.

**Фитооценка почв по длине и массе проростков пшеницы.** Показатели интенсивности начального роста растений пшеницы (длина и масса зеленых проростков и корней) по сравнению с показателями прораствания семян оказались более чувствительными к величине внесения кадмия, особенно в каштановую почву. Несмотря на регулярный полив, наблюдался «эффект засухи»: разрушалась структура почвы, происходило сильное уплотнение и образование на поверхности белесых солевых корок. Листья растений утончались и скручивались как по ширине, так и по длине.

Токсичность кадмия была выявлена уже при дозе 40 мг/кг. При этом снижение длины зеленых проростков и корней по отношению к контролю, составило 38 и 29 %, а массы – 50 и 60 %, соответственно. В опыте с дерново-подбуром токсичность кадмия проявилась только при дозах от 160 мг/кг и более, а меньшие концентрации (40-80 мг/кг), напротив, стимулировали увеличение длины (104-130 % от контроля) и массы (110-126 % от контроля) надземной и корневой частей растений.

По нашим данным, свинец оказывал стимулирующее влияние при дозах 50, 100 и в ряде случаев 200 мг/кг на длину и фитомассу проростков пшеницы, максимальные величины которых составили соответственно от 108 до 146 % и от 106 до 137 % от контроля. Влияние продолжительности взаимодействия при этом выглядело следующим образом: при увеличении срока с 7 до 30 суток стимулирующий эффект проявился сильнее, а токсичное действие – слабее.

### **Выводы**

1. Превышение ПДК тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, W, Mo, As и Sb) в лежалых сульфидных продуктах и отвальных хвостах обогащения молибденовых и сульфидно-вольфрамовых руд достигает 100 и более раз. По показателю суммарного геохимического загрязнения (Zc), состояние почвенного покрова большей части территории оценивается как опасное (Zc варьирует в диапазоне 32-128). На отдельных участках, приуроченных к источникам загрязнения, фиксируются значения Zc превышающие 128-4000, их состояние характеризуется как чрезвычайно опасное.

2. Различные соотношения техногенного песка и почвы неодинаково влияли на фитомассу растений (салат, горчица, овес, петрушка). С увеличением доли техногенного песка, поступающие из субстрата тя-

желые металлы распределялись по органам растений неравномерно: в корнях накапливалось больше, чем в надземной части. Способность культур к извлечению тяжелых металлов из загрязненной техногенными песками почвы заметно различалась. Овес характеризовался максимальным выносом кадмия, свинца и меди, в 2,0-5,7 раза выше контроля. Растения горчицы характеризовались наибольшим выносом цинка, в среднем в 2,7 раза выше контроля.

3. Общий вынос кадмия ярутки лесной изменялся в зависимости от его доз и сроков выдерживания от 0,13 до 12,92 мг/м<sup>2</sup>. Максимальный вынос после 1 месяца был достигнут при дозе кадмия 50 мг/кг, а после 1 года – при 100 мг/кг. Внесение ЭДТА в дозе 3 ммоль/кг оказалось нецелесообразным, т.к. приводило к полной гибели растений.

4. Кадмий в зависимости от концентрации в почве и продолжительности сроков выдерживания проявлял в отношении ярутки лесной токсичное, нейтральное и (или) стимулирующее действия. Дозы кадмия от 1 до 100 мг/кг почвы резко снижали фитомассу, а более высокие вызвали гибель растений. Увеличение срока взаимодействия почвы с металлами с 1 месяца до 1 года значительно снизило токсичность кадмия, а относительно невысокие его дозы (1-10 мг/кг) даже стимулировали накопление фитомассы по сравнению с контролем.

5. Кадмий и свинец проявляли нейтральное, стимулирующее и токсичное (вплоть до летального) действие на показатели прорастания и интенсивность начального роста пшеницы в зависимости от концентраций элементов, типа почв и сроков их взаимодействия с почвой. При увеличении срока взаимодействия стимулирующий эффект от ТМ по сравнению с контролем проявлялся сильнее, а токсичное действие – слабее.

6. Наиболее информативными показателями фитотоксичности возрастающих доз кадмия и свинца при различных сроках их взаимодействия с почвами оказались длина и масса проростков пшеницы, в меньшей степени – продолжительность и дружность прорастания. Всхожесть и энергия прорастания были малочувствительными и их использование целесообразно только при высоком уровне загрязнения почв Cd и Pb.

7. В настоящее время необходима полномасштабная апробация технологии фитоэкстракции ТМ из загрязненных почв г. Закаменска. Особое значение приобретает подбор растений-гипераккумуляторов, с максимальной степенью извлечения ТМ из почвы, малым вегетацион-

ным периодом, большой фитомассой, неприхотливостью в процессе культивирования, а также поиск эффекторов фитоэкстракции, увеличивающих подвижность ТМ и усиливающих их вынос из загрязненных почв.

### Список основных публикаций по теме диссертации

1. Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.**, Убугунов Л.Л. Оценка фитотоксичности кадмия в дерново-лесной почве // Вестник БГСХА. – 2009. - №3 (16). – С. 59-65.

2. Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.** Оценка фитотоксичности кадмия в каштановой почве // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 5. – С. 13-17.

3. Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.**, Убугунов Л.Л. Оценка фитотоксичности свинца в каштановой почве и дерново-подбуре (Западное Забайкалье) // Проблемы агрохимии и экологии. – 2010. – № 3. – С. 19-24.

4. Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.** Оценка фитотоксичности свинца в дерново-подбуре // Вестник ТГУ. – 2010. – № 338. – С. 207-211.

5. Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.** Оценка фитотоксичности кадмия в дерново-подбуре и каштановой почве // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Мат-лы VI междунар. науч.-практ. конф. Т. II. – Семей, 2010 г. – С. 330-334.

6. **Доржонова В.О.**, Убугунов В.Л. Оценка фитотоксичности свинца в каштановой почве // Современные проблемы загрязнения почв: Мат-лы III междунар. науч. конф. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – С. 208-212.

7. Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.** Фитоэкстракция кадмия из дерново-подбур с помощью растений-гипераккумуляторов (на примере ярутки лесной) // Оптимизация агрохимических свойств и продукционных процессов в горно-степных экосистемах: Мат-лы всеросс. науч.-практ. конф. с междунар. уч. – Улан-Удэ, 2010 г. – С. 205-207.

8. Убугунов В.Л., Убугунов Л.Л., **Доржонова В.О.** Очистка почвенного покрова г. Закаменска от тяжелых металлов // Фундаментальные и инновационные аспекты биогеохимии: Мат-лы VII междунар. биогеохим. школы. – Астрахань, 2011. – С. 270-274.

9. Убугунов Л.Л., Убугунов В.Л., **Доржонова В.О.** Тяжелые металлы в техногенных ландшафтах Юго-Западного Забайкалья (городская и пригородная зоны г. Закаменск) и методы их детоксикации // Фунда-

ментальные и инновационные аспекты биогеохимии: Мат-лы VII междунар. биогеохим. школы. – Астрахань, 2011. С. – 270-274.

10. **Доржонова В.О.**, Убугунов В.Л., Убугунов Л.Л. Фиторемедиация загрязненных кадмием почв г. Закаменска (Юго-Западное Забайкалье) // Мат-лы VI съезда Об-ва почвоведов им. В. В. Докучаева: сб. научн. тр. – Петрозаводск, 2012. – С. 265-267.