

ГОРДЕЕВА Ольга Николаевна

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЕ» В ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ
УСЛОВИЯХ ПРИАНГАРЬЯ**

25.00.36 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

ИРКУТСК – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте геохимии им. А. П. Виноградова Сибирского отделения
Российской академии наук (ИГХ СО РАН)

**Научный
руководитель:** Кандидат геолого-минералогических наук
Белоголова Галина Александровна
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИГХ СО РАН, г. Иркутск

**Официальные
оппоненты:** Доктор геолого-минералогических наук, профессор
Рихванов Леонид Петрович
Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск

Доктор технических наук, профессор
Руш Елена Анатольевна
Иркутский государственный университет путей сообщения,
г. Иркутск

**Ведущая
организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Иркутск

Защита диссертации состоится 17 июня 2013 г. в 9.00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а; конференц-зал. Факс (3952)427050; e-mail: korol@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

Автореферат разослан « 14 » мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.г.-м.н.



Королева Г.П.

Введение

Актуальность работы. Изучение закономерностей мобилизации и миграции тяжелых металлов (ТМ) в системе «почва-растение» в техногенных экосистемах является одной из актуальных научных проблем. В настоящее время эколого-геохимические исследования в условиях техногенеза базируются, в основном, на изучении распределения валовых содержаний элементов. Проблема исследования форм нахождения токсичных элементов в почвах, затронутых техногенным загрязнением, остается недостаточно изученной. Это касается и промышленно освоенной территории Приангарья, где геоэкологические исследования такого рода практически не проводились, о чем свидетельствуют имеющиеся литературные данные. Между тем, в условиях техногенеза многие химические элементы качественно меняют естественные геохимические формы миграции на более подвижные легкорастворимые и доступные для растений. Среди них большую роль играют низкомолекулярные органические соединения, обладающие повышенной токсичностью для живых организмов. Это в первую очередь относится к соединениям Cd, Pb, Hg, As.

Целью данной работы является изучение особенностей распределения, миграции и накопления химических элементов в почвах и растениях в природных и техногенных условиях Приангарья.

Задачи исследования:

1) Рассмотреть особенности общего распределения элементов в почвах промышленных городов Свирск, Усолье-Сибирское и, для сопоставления, в почвах Усть-Ордынского Бурятского округа.

2) Изучить формы нахождения химических элементов в природных и техногенно трансформированных почвах г. Свирска и его окрестностей.

3) Исследовать особенности накопления химических элементов различными видами сельскохозяйственных и дикорастущих растений, грибов в природных и техногенных условиях г. Свирска.

4) Провести анализ форм нахождения ртути в почвах г. Усолье-Сибирское и влияние этих форм на бионакопление ртути.

Научная новизна и теоретическая значимость. Впервые проведено комплексное исследование, включающее изучение форм нахождения элементов в гумусовом горизонте и по профилю почв. Представлены валовые содержания химических элементов в природных и техногенных почвах Приангарья. На основе валовых содержаний As и ТМ построены схемы распределения их в почвах г. Свирска. Установлена взаимосвязь между подвижностью химических элементов в почвах и накоплением их растениями. Проведена оценка доступности необходимых элементов питания для различных видов культурных и дикорастущих растений.

Практическая значимость. Результаты проведенных геоэкологических исследований показывают возможность использования некоторых видов дикорастущих растений для фиторемедиации и рекультивации техногенно загрязненных почв. Полученные данные обладают практической ценностью, так как могут быть использованы при экологической оценке определенных техногенно трансформированных территорий и их почвенного покрова, а также при установлении качества растительной продукции с точки зрения экологической безопасности. Теоретические и практические результаты работы можно использовать при моделировании и анализе техногенных

процессов, оказывающих непосредственное воздействие на геосистемы и объекты окружающей среды, а также при проведении комплексных экологических исследований на территории Приангарья. Полученные автором научные результаты могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений для подготовки специалистов геоэкологической направленности.

Основные защищаемые положения.

1. Полиэлементное загрязнение окружающей среды г. Свирска, основным источником которого является бывшая промплощадка металлургического завода, стало не только причиной увеличения содержаний тяжелых металлов в почвах города относительно допустимых норм и регионального фона, но и накопления приоритетного элемента-загрязнителя – мышьяка – в почвах, растениях, грибах, продуктах питания человека.

2. В техноземах г. Свирска преобладают процессы иммобилизации – химические элементы, кроме кадмия, находятся в основном в труднорастворимой остаточной форме. При удалении от промзоны в почвах усиливаются процессы мобилизации элементов за счет увеличения их содержаний в потенциально подвижных формах. Ртуть в почвах г. Усолье-Сибирское и его окрестностей находится преимущественно в органических и прочносвязанных формах, независимо от степени загрязнения почвы.

3. Формы нахождения химических элементов в почвах наряду с видовой принадлежностью растений, толерантностью их по отношению к элементам-токсикантам и межэлементными связями оказывают существенное влияние на биодоступность элементов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 45 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах ВАК, 40 статей и тезисов в материалах различных конференций.

Апробация и внедрение результатов. Основные результаты исследования были представлены на 13 международных и 26 всероссийских конференциях. Международные конференции: Четвертая Сибирская международная конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2008), «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2010) и др. Всероссийские конференции: «Человек: здоровье и экология», Восточно-Сибирский научный центр СО РАМН (Иркутск, 2008), «Современные проблемы геохимии» (Иркутск, 2009), «Геохимия ландшафтов и география почв» (Москва, 2012) и др.

Материалы диссертации использовались при проведении оценочных работ по ликвидации мышьяковых отвалов в г. Свирске.

Личный вклад автора заключается в постановке целей и задач исследования, проведении полевых исследований по отбору различных образцов окружающей среды, лабораторном получении постадийных вытяжек, статистической обработке, обобщении и интерпретации результатов.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 172 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, 1 приложения, списка литературы, который включает 281 источник, из них 105 на иностранных языках. Диссертация содержит 26 рисунков, 56 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю к.г.-м.н. Г.А. Белоголовой за постоянное содействие, ценные советы и всестороннюю поддержку при подготовке рукописи диссертации. Особую благодарность сотрудникам аналитических подразделений ИГХ СО РАН к.г.-м.н. О.А. Складовой, Л.Д.

Андрулайтис, О.С. Рязанцевой, А.Г. Арсентьевой, к.х.н. О.А. Пройдаковой, М.Г. Кажарской, Т.В. Вороновой, Е.В. Савенковой, д.х.н. Т.Н. Гуничевой, к.х.н. Е.В. Чупариной, П.Т. Долгих, Т.Н. Галкиной, Н.Д. Судаковой, выполнивших весь объем химического анализа элементов в различных пробах. Автор признателен д.г.-м.н. А.М. Плюснину, к.г.-м.н. О.А. Склярской, к.б.н. М.В. Пастухову, к.г.-м.н. В.И. Алиевой, к.г.-м.н. Н.А. Китаеву, д.г.-м.н. В.И. Гребенчиковой за помощь, ценные советы и замечания при подготовке работы.

Глава 1. Краткая характеристика территории исследования

Рассмотрены природные особенности территории исследования, влияющие на формирование почв, поступление и миграцию в них химических элементов. Среди природных факторов большое значение имеют почвообразующие породы. Изученные в данном исследовании черноземы и серые лесные почвы формируются на обогащенных карбонатами Са и Mg лессовидных суглинках. В солонцеватом черноземе, встречающемся в долине р. Куды (Усть-Ордынский Бурятский округ), повышено содержание легкорастворимых солей, что связано с коренными породами, обогащенными гипсом, органическими соединениями, карбонатами Са. Почвообразующие породы дерново-карбонатных почв представлены карбонатными и красноцветными карбонатно-силикатными кембрийскими отложениями. В этой связи в составе обменных катионов почв преобладают Ca^{2+} и Mg^{2+} (Атлас..., 2004; Лопатовская, Михайличенко, 2002).

С залежами поваренной соли (Усольский район) в нижнекембрийских отложениях генетически связаны хлоридные натриевые и кальциевые рассолы (Подземные воды..., 1961), обогащающие почвы Са и Na.

Региональная специфика климата – значительная суровость в сочетании с недостаточной увлажненностью – обуславливает некоторые общие черты почти всех почв Приангарья: длительное сохранение сезонной мерзлоты, маломощность гумусового горизонта, повышенное содержание в нем гумуса, наличие водорастворимых солей и др. Ветровой режим способствует перемещению загрязняющих компонентов с воздушными массами вдоль Иркутско-Черемховской равнины главным образом с северо-запада на юго-восток (Справочник..., 1966-1976; Иркутско-Черемховский..., 1969; Атлас..., 2004).

Промышленное освоение Приангарья привело к усилению влияния антропогенного фактора на почвенно-растительный покров. Одним из техногенных источников загрязнения окружающей среды Приангарья являлся бывший металлургический завод по производству As, до 2012 года расположенный в г. Свирске. Вместе с заводами «Востсибэлемент», «Автоспецоборудование», «Ремонтно-механический» и ТЭЦ он образовывал промышленную зону на территории города. В работе представлены результаты исследований, проведенных на территории г. Свирска и в его окрестностях, в период с 2005 по 2012 годы. Техногенным источником загрязнения ртутью Приангарья является химическое предприятие «Усольхимпром» (г. Усолье-Сибирское), где до 1998 года в цехе ртутного электролиза использовалась Hg. Временной интервал исследований на усольском участке включает 2010-2012 годы.

Глава 2. Сорбционные свойства почвы и формы нахождения в ней химических элементов

Представлен обзор литературы по сорбционным свойствам почвы, влияющим на процессы мобилизации и иммобилизации химических элементов в почвах. Основным

механизмом удержания элементов в почвах является адсорбция, сущность которой состоит в закреплении на поверхности твердой фазы или жидкости компонентов из газовой или жидкой фаз. Сорбционные свойства почвы определяются наличием в ней органических веществ, глинистых минералов, оксидов и гидроксидов Al, Fe, Mn, карбонатов, фосфатов, сульфидов. Большое значение в процессах мобилизации-иммобилизации элементов имеют кислотно-основные свойства и окислительно-восстановительный потенциал почвы. Конкуренция за адсорбционные места между ионами металлов может приводить к увеличению их подвижности и биодоступности (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Елпатьевский, 1993; Ладонин, Пляскина, 2004).

Одним из основных подходов к изучению подвижных и закрепленных форм элементов в почвах является метод фракционирования. Предложены различные модификации этого метода, основанные на получении последовательных или параллельных (одноступенчатых) вытяжек из почв (Кочарян и др., 1969; Круглова и др., 1981; Хитров, 1986; Кузнецов и др., 1990; Bascomb, 1968; Mitchell, 1972; McLaren et al., 1973; Sedberry et al., 1976; Tessier et al., 1979; Salomons et al., 1984; Shuman, 1985; Kersten et al., 1986; Papp et al., 1991; Ure et al., 1995; Berti et al., 1997; Rauret et al., 1999; Filgueiras et al., 2002; Bloom et al., 2003; Hlavay et al., 2004; Mikutta et al., 2005; и др.).

К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт российских и зарубежных исследований форм нахождения химических элементов в почвах. Миграция химических элементов в техногенно нарушенных почвах рассмотрена в работах (Пампура, 1996; Пляскина, 2007; Яковлев и др., 2008; Плеханова, Бамбушева, 2009; Карпухин, 2009; Никифорова, Кошелева, 2009; Панин, Калентьева, 2009; Рогова, 2010; и др.). Среди зарубежных исследований в этом направлении известны работы (Heltai et al., 2008; Vojtekova et al., 2008; Blaskova et al., 2008; и др.), в том числе при изучении миграции элементов в системе «почва-растение» (Kubova et al., 2008).

Комплексное изучение форм элементов в почвах, содержаний их в растениях, биосубстратах человека на урбанизированных территориях представлено в работе М. Дюриш (2001), в природных водах, донных осадках, почвах, растительности под воздействием сульфидных отвалов – в исследовании Б. А. Колотова и др. (2001).

Формы нахождения элементов изучены в почвенных растворах при загрязнении и рекультивации почв (Смирнова, 2009), при термодинамических расчетах содержаний тяжелых металлов в почвенных растворах и водных вытяжках (Ендовицкий и др., 2009).

Многие исследования проводятся с выделением только подвижных или потенциально подвижных форм элементов: при изучении особенностей их миграции в загрязненных почвах (Макаров и др., 1994; Белозерцева, 2000; Савосько, 2001; Волков, Иванов, 2001; Волков, 2006; Remeteiova et al., 2008; Пузанов, Бабошкина, 2009; и др.), разработке предельно допустимой техногенной нагрузки на загрязненные почвы и фитомелиорации этих почв (Алхутова, 2010), изучении химического состава растений в условиях техногенного загрязнения (Салтан, 2009; Щербенко, 2008), биогеохимических исследованиях природных и техногенных территорий (Кудеярова, Семенюк, 1999; Ильин, Сысо, 2001; Павлюкова, Гришко, 2001; Панин, Касимова, 2006; Стульникова, 2009; Сосорова, Ширеторова, 2009; и др.), классификации загрязненных (Глазовская, 1994) и изучении природных почв (Кашин, Иванов, 1999; Ахметова, 2009).

Данные о формах нахождения элементов в почвах применяются при построении эколого-геохимических карт (Жовинский и др., 2004).

В агрохимическом направлении изучаются подвижные формы элементов питания растений в почвах и поступление их в сельскохозяйственную продукцию (Сысо, Ильин, 2008), в том числе под влиянием удобрений (Карпова, 2006; Зубченко, 2006; Лебедева, Арзамасова, 2008; Госс, 2008; Егоров и др., 2009; и др.).

Почвы Приангарья изучены в этом плане недостаточно. В ряде работ при исследовании почв и растений природных и техногенных ландшафтов рассмотрены наиболее подвижные формы элементов без выделения последующих фракций (Копосов, 1983; Мальцев и др., 1998; Седых, 2002; Кузьмин, 2005; и др.). Формы нахождения As и ТМ в природных и техногенных почвах Приангарья изучались Г. А. Белоголовой (Белоголова и др., 1997, 2009). Настоящая работа представляет собой более глубокое геоэкологическое исследование почвенно-растительного покрова Приангарья.

Глава 3. Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются почвы, растения, высшие грибы (рис. 1). В г. Свирске изучены почвы в 5-300 м от промплощадки металлургического завода (техноземы); окультуренные дерново-карбонатные почвы дачных участков в ~200-500 м от промзоны; целинные и окультуренные дерново-карбонатные почвы окрестностей города; окультуренные черноземы в 15 км от города.

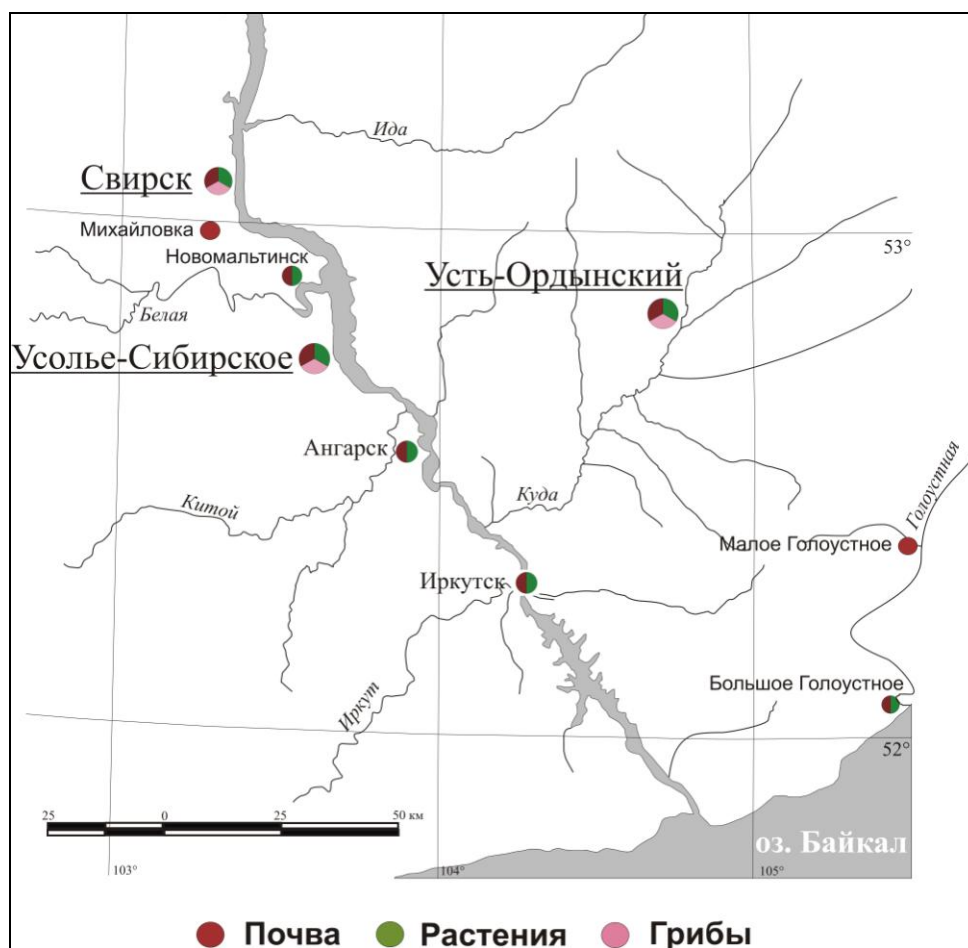


Рис. 1. Карта-схема района работ и участков отбора почв, растений, грибов

В г. Усолье-Сибирское исследовались окультуренные дерново-карбонатные почвы частных хозяйств, расположенных в 2-3 км от «Усольехимпрома»; дерново-карбонатные и серые лесные почвы на территории «Усольехимпрома» в 1,5-2,5 км от цеха ртутного

электролиза; целинные дерново-карбонатные почвы в окрестностях г. Усолье-Сибирское; окультуренные дерново-карбонатные почвы в 30 км от города.

С целью сопоставления изучены солонцеватые черноземы и дерново-карбонатные почвы Усть-Ордынского Бурятского округа, где нет опасных химических производств, а основными источниками загрязнения являются выбросы автотранспорта, удобрения.

Для изучения особенностей бионакопления химических элементов в г. Свирске и его окрестностях отобрана надземная биомасса дикорастущих растений – паслена сладко-горького *Solanum dulcamara* L., кровохлебки аптечной *Sanguisorba officinalis* L.; березы повислой *Betula pendula* Roth, а также ее ксилемные образования. Изучены разные виды пластинчатых грибов (*Lactarius torminosus*, *L. pubescens* и др.). На дачных участках г. Свирска отобраны культурные растения (листья капусты, клубни картофеля, корнеплоды моркови).

В окрестностях г. Усолье-Сибирское изучены дикорастущие растения – кровохлебка аптечная *Sanguisorba officinalis* L., герань луговая *Geranium pratense* L., горошек мышиный *Vicia cracca* L., костяника каменистая *Rubus saxatilis* L., осока мохнатая *Carex hirta* L., осот огородный *Sonchus oleraceus* L., тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L.; береза повислая *Betula pendula* Roth и ее ксилемные образования, ива белая *Salix alba* L., ива козья *S. caprea* L. Изучены плодовые тела пластинчатых и трубчатых грибов (*Lactarius torminosus*, *Russula betularum*, *R. Adusta*, *Leccinum scabrum* и др.). В частных хозяйствах г. Усолье-Сибирское отобраны овощные культуры (клубни картофеля, корнеплоды моркови).

Почвы и дикорастущие растения анализировали методом атомной адсорбции, культурные растения (картофель) и березовый сок – ICP-MS. Все виды химического анализа проводились в Аккредитованном аналитическом секторе ИГХ СО РАН.

Кроме валовых содержаний изучены формы нахождения химических элементов в почвах г. Свирска и его окрестностей по методикам (Кузнецов, Шимко, 1990). Определение элементов в вытяжках проведено атомно-абсорбционным методом на спектрометре модели Perkin-Elmer-503 (США).

При экстракции различных форм As, Cd, Pb, Cu, Zn, Cr, Al, Fe, Mn, Na, Ca, Mg, K, P из почв получены фракции: легкообменная, карбонатная, органическая, Fe-Mn-гидроокислов и адсорбированных на них элементов, нерастворимый остаток. Согласно методике (Кузнецов, Шимко, 1990) элементы, содержащиеся в легкообменной фракции, наиболее подвижны и доступны для растений; элементы, связанные с карбонатами, органическим веществом почв и оксидами и гидроксидами Fe, Mn обладают меньшей подвижностью и являются ближайшим резервом элементов, способных высвободиться при изменении pH, Eh и некоторых других параметров почвы. Наименее подвижные и недоступные для растений элементы находятся в нерастворимом остатке, представляющем собой слабо-растворимые минеральные формы.

Формы нахождения Hg изучались в почвах «Усольехимпрома» и окрестностей г. Усолье-Сибирское по методике (Bloom et al., 2003), согласно которой в две первые фракции – водо- и кислоторастворимую – переходят наиболее растворимые и подвижные соединения Hg. В последующих трех фракциях извлекается Hg, входящая в органические комплексы, прочносвязанная в решетке минералов и Hg в сульфидной форме. По данным (Bloom et al., 2003) органическая фракция включает гуматы Hg и метилртуть. Анализ Hg в вытяжках осуществляли методом атомной адсорбции на спектрометре «РА-915+».

Всего было отобрано 687 различных проб: почв – 430, культурных – 85 и дикорастущих растений – 116, березового сока – 22, грибов – 34.

Данные, представленные в таблицах и на рисунках автореферата, основаны на обобщенном фактическом материале, приведенном в диссертационной работе.

Глава 4. Распределение и формы нахождения химических элементов в природных и техногенных почвах Приангарья

Распределение химических элементов в почвах. Приоритетными загрязнителями окружающей среды г. Свирска являются As, Cd, Pb, Hg, Cu и Zn. Максимальные их концентрации установлены в почвах промплощадки мышьякового завода (табл. 1).

Таблица 1

Содержания мышьяка и тяжелых металлов в верхнем горизонте почв г. Свирска и его окрестностей, мг/кг

Место отбора	As	Cd	Pb	Cu	Zn
Промышленная зона горизонт A ₀ +A (n=42) ¹	2832±2160 ² 32-36700	1,35±1,1 0,16-16	7708±2932 24-207000	563±341 20-14020	294±381 81-1833
Дачные участки горизонт A _{пах} (n=30)	57±61,4 9,6-260	0,33±0,14 0,16-0,78	81,2±51,2 13,7-196	42,4±19,2 14,7-87,0	117±48 42,5-225
Прочие почвы города ³ горизонт A ₀ +A (n=44)	48±41 9,1-220	0,23±0,10 0,10-0,62	39±42,9 13-250	31,1±11,7 10-57	90±28 48-164
Лес, окрестности горизонт A ₀ +A (n=8)	28,3±16,3 14-62	0,22±0,058 0,13-0,29	51±39 7,8-123	30,1±7,1 20-44	82±3,9 78-90
Пашня, окрестности горизонт A _{пах} (n=4)	11,8±1,02 10,3-12,6	0,17±0,037 0,13-0,22	25,3±9,3 19,0-39,0	32,3±5,6 24,0-36,0	85,3±8,5 76,0-93,0
15 км от города горизонт A _{пах} (n=9)	10,8±1,4 7,9-12,0	0,20±0,05 0,15-0,31	20±2,8 15,0-24,0	32,6±3,5 26,0-38,0	90,2±7,2 76,0-98,0
Региональный фон ⁴	–	–	10,0	46-51	84-91
Кларк ⁵	5-8,7	0,48	10-40	23,9	56±5
ОДК (Контроль..., 1998)	2-10	0,5-2	32-130	33-132	55-220

¹Здесь и далее (n) – количество проб. ²Среднее±s.d. (стандартное отклонение). Минимальное-максимальное. ³Почвы, удаленные от промзоны: лесопарковые зоны, побережье р. Ангары.

⁴Гребенщикова и др., 2008 (горизонт A). ⁵Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Иванов, 1996-1997.

Концентрации As и ТМ в почвах снижаются по мере удаления от завода. В почвах дачных участков г. Свирска, расположенных в зоне техногенного влияния, максимальные концентрации As достигают 26 ОДК, Pb – 1,5 ОДК. Этот факт имеет немаловажное значение в связи с возможностью включения As и Pb в пищевую цепь человека. В южной части города на побережье р. Ангары установлен второй участок повышенного содержания As и ТМ в почвах, связанный с расположенной здесь ранее свалкой. В целом, все почвы г. Свирска и его окрестностей в той или иной степени загрязнены As.

Содержания Pb, максимальные содержания Cu, Zn, а также Cr, Ni, Co в почвах города и его окрестностей выше регионального фона. Концентрации Cr в техноземах достигают 1,6 ПДК. Для Cd характерно узколокальное накопление в почвах промплощадки мышьякового завода, при удалении от которой содержания Cd снижаются до кларковых значений.

Распределение Hg показано в почвах гг. Свирск и Усолье-Сибирское (табл. 2). Максимальные ее содержания установлены в почвах промзоны г. Свирска. В других почвах города средние и максимальные концентрации Hg находятся в пределах допустимых норм (ПДК 2,1 мг/кг, Контроль..., 1998), но выше регионального фона (0,02 мг/кг, Гребенщикова и др., 2008). В пахотных почвах в 15 км от г. Свирска средние содержания Hg самые низкие, но максимальные остаются выше регионального фона.

Таблица 2

Содержания ртути в верхнем горизонте почв гг. Свирск, Усолье-Сибирское и их окрестностей, мг/кг

г. Свирск	Промышленная зона горизонт A ₀ +A (n=35)	0,31±0,27 ¹ 0,021-4,56	г. Усолье-Сибирское	1,5-2,5 км от ЦРЭ горизонт A ₀ +A (n=14)	0,26±0,28 0,006-0,77
	Дачные участки горизонт A _{пах} (n=9)	0,036±0,011 0,024-0,057		Частный сектор ² горизонт A _{пах} (n=10)	0,046±0,022 0,013-0,081
	Лес, окрестности горизонт A ₀ +A (n=8)	0,039±0,036 0,013-0,077		Лес, окрестности горизонт A ₀ +A (n=5)	0,205±0,16 0,061-0,466
	15 км от города горизонт A _{пах} (n=9)	0,016±0,008 0,01-0,035		30 км от города горизонт A _{пах} (n=15)	0,035±0,016 0,016-0,078

¹Среднее±s.d. Минимальное-максимальное. ²В 2-3 км от «Усольехимпрома».

В почвах территории «Усольехимпрома» содержания Hg в почвах не превышают ПДК, но на порядок выше регионального фона. Невысокие, относительно допустимых норм, концентрации Hg связаны с отбором почв на расстоянии 1,5-2,5 км от цеха ртутного электролиза. По данным (Коваль и др., 2000) непосредственно вблизи цеха концентрации Hg в почвах достигали 100 мг/кг.

Содержания Hg в пахотных почвах г. Усолье-Сибирское и участка в 30 км от города не превышают ПДК, но выше регионального фона. Средние и максимальные содержания Hg в почвах окрестностей г. Усолье-Сибирского и территории «Усольехимпрома» находятся в пределах одних порядков, что обусловлено дополнительным загрязнением почв окрестностей города газопылевыми выбросами ТЭЦ, расположенной вблизи химического комбината.

Таким образом, полиэлементное загрязнение почв гг. Свирск и Усолье-Сибирское носит локальный характер – при удалении от основных техногенных источников концентрации As и ТМ в почвах снижаются на несколько порядков. Пахотные почвы дачных участков г. Свирска наряду с наиболее опасными элементами-токсикантами (As, Cd, Pb, Hg) содержат повышенные, относительно регионального фона и кларков, концентрации Cu, Zn, Cr, Ni, Co.

Содержания макроэлементов в природных и техногенных почвах слабо дифференцированы. Исключением является Fe – в технозомах средние его концентрации в 1,9 раза (максимальные на порядок) выше кларка, что обусловлено Fe-содержащими огарками, образовавшимися при обжиге мышьяковой руды. Прослеживается тенденция увеличения валовых концентраций большинства макроэлементов в почвах при удалении от промплощадки завода.

Формы нахождения химических элементов в почвах.

Мышьяк. Одной из главных особенностей миграции As в максимально загрязненных технозомах г. Свирска в 5 м от отвалов завода является высокое его

содержание в малорастворимой остаточной фракции (рис. 2). Кислая реакция этих почв ($pH_{\text{водн}} 4,6$) не имеет большого влияния на подвижность As, так как образующиеся арсенат-ионы связываются оксидами и гидроксидами Fe, в больших количествах присутствующих в технозомах.

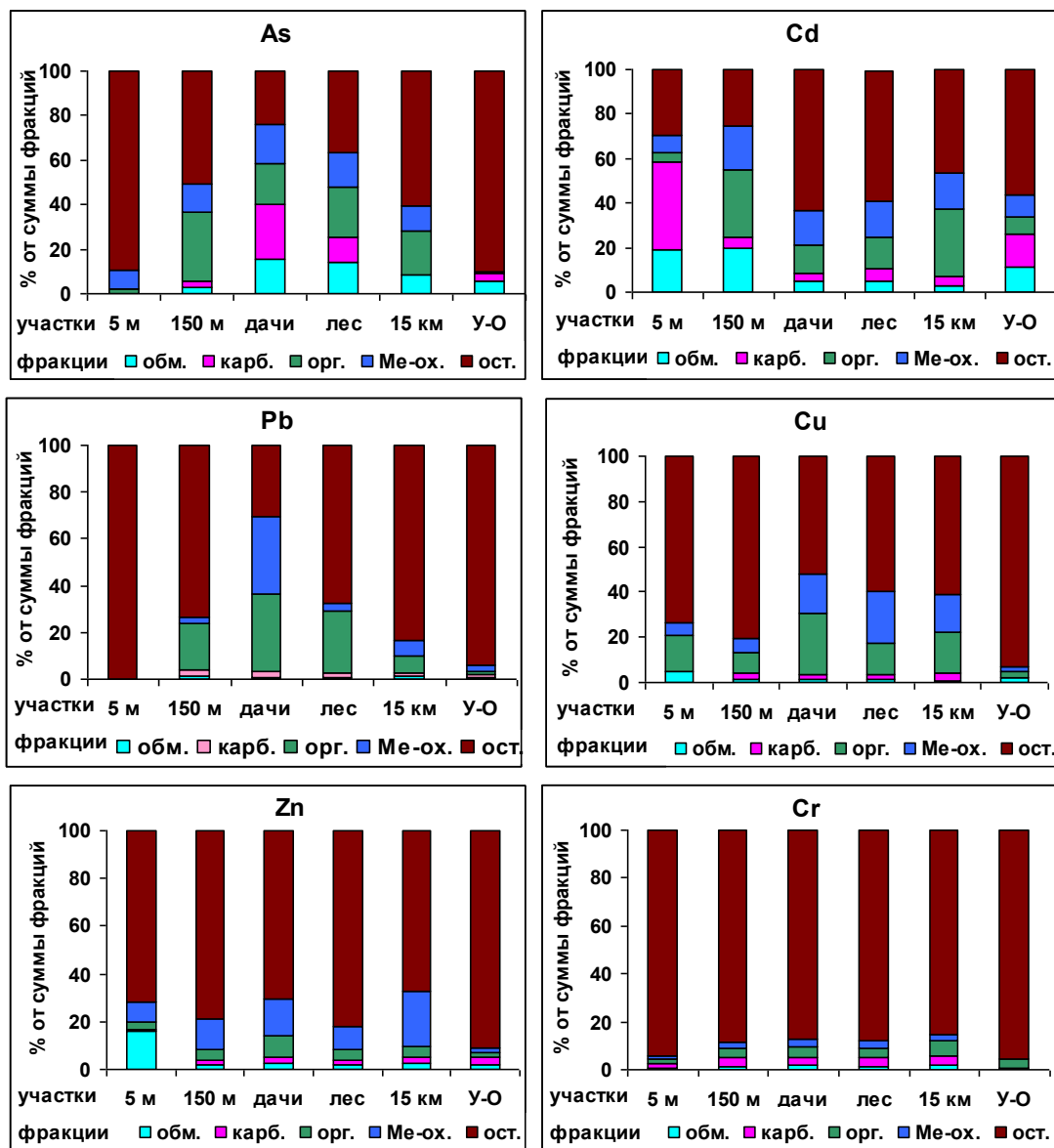


Рис. 2. Распределение As и ТМ по фракциям верхнего горизонта почв (процент от суммы фракций)

Участки: 5 м и 150 м – расстояние от отвалов завода (гор. A_0+A), дачи – 200-500 м от завода (гор. A_{max}), лес – окрестности г. Свирска (гор. A_0+A), 15 км – участок в 15 км от города (гор. A_{max}), У-О – Усть-Ордынский Бурятский округ (гор. A_{max}). Фракции: обм. – обменная, карб. – карбонатная, орг. – органическая, Me-ox. – оксидов и гидроксидов Fe и Mn, ост. – остаточная.

Карбонаты Ca и Mg также сорбируют As – увеличение его в карбонатной фракции наблюдается в технозомах и в почвах Усть-Ордынского округа в нижних почвенных горизонтах, где возрастают содержания карбонатов Ca и Mg. В технозомах в 5 м от отвалов значительная часть As связана с органическим веществом.

В результате сорбции As различными компонентами техноземов в 5 м от отвалов завода, подвижность его здесь самая низкая – содержание в легкообменной фракции составляет 0,04 %. По мере удаления от отвалов завода подвижность As в почвах

возрастает. Это касается и почв дачных участков, где установлено самое низкое содержание As в наиболее закрепленной остаточной фракции (23,8 %). Соответственно в этих почвах возрастает доля As в подвижной (15,3%) и потенциально подвижных фракциях – карбонатной, органической, железо-марганцевой (61 %). Такое увеличение подвижности As в почвах дачных участков может быть связано с особенностями их использования и обработки. Вносимые в почву слаборазложившиеся органические удобрения могут способствовать росту подвижности элементов (Титова и др., 2001).

В почвах окрестностей г. Свирска (лес) подвижность As остается достаточно высокой, выше, чем в почвах участка в 15 км от города. Значительное снижение подвижности As и увеличение его содержаний в нерастворимом остатке происходит в пахотных почвах Усть-Ордынского округа.

Кадмий наиболее подвижен в техноземах (5 и 150 м от отвалов завода), где установлены самые высокие его содержания в легкообменной фракции. При удалении от отвалов завода подвижность Cd снижается, достигая минимума в почвах участка в 15 км от г. Свирска. Снижение подвижности Cd происходит за счет связывания его различными компонентами почв. В техноземах наибольшее значение в иммобилизации Cd имеют карбонаты и органическое вещество почвы. В почвах других участков помимо нерастворимого остатка, достаточно высока доля Cd в органической и Fe-Mn фракциях.

Снижению подвижности Cd способствуют нейтральные и слабощелочные значения pH почв, удаленных от завода. Доля Cd в наиболее закрепленной фракции почв – остаточной – относительно невысокая и увеличивается при удалении от промплощадки завода. С одной стороны, это указывает на высокую мобильную способность Cd в техноземах по сравнению с другими ТМ, с другой стороны – подчеркивает тенденцию снижения подвижности Cd в менее загрязненных почвах.

Распределение Cd по фракциям пахотных почв Усть-Ордынского округа происходит несколько иначе. В почвах округа на порядок повышено содержание Cd в легкообменной и карбонатной фракциях, а в органической и железо-марганцевой – на порядок понижено относительно пахотных почв дачных участков г. Свирска и участка в 15 км от города. Это может быть связано с иной геохимической обстановкой в почвах Усть-Ордынского округа, для которых характерно более высокое содержание легкорастворимых солей, в составе которых, по-видимому, присутствует и Cd.

Свинец в большинстве изученных почв находится в малорастворимой остаточной фракции, особенно в техноземах в 5 м от отвалов завода. Подкисление верхнего горизонта и высокие валовые содержания Pb в этих почвах стали причиной некоторого увеличения легкообменного Pb до величины (4,4 мг/кг), не превышающей ПДК для его подвижной формы, которая по (Контроль..., 1998) составляет 6 мг/кг.

В пахотных почвах дачных участков г. Свирска при низких содержаниях легкообменного Pb повышена его доля в потенциально подвижных фракциях, растворение которых может привести к увеличению подвижных и биодоступных форм этого металла. В пахотных почвах участка в 15 км от города и пахотных почвах Усть-Ордынского округа Pb преобладает в остаточной фракции.

В целом, для удаленных от промзоны почв характерно увеличение содержания Pb в резервных фракциях, что указывает на возрастание его потенциальной подвижности в менее загрязненных почвах. Повышенное содержание Pb в органической фракции, относительно других его резервных фракций, свидетельствует о том, что кроме слабо

подвижных минеральных соединений в миграции Рb большую роль играют его органические комплексы.

Медь и цинк. В техноземах в 5 м от отвалов завода содержания легкообменных Cu и Zn на порядок выше ПДК для их подвижных форм, которые по (Контроль..., 1998) составляют 3 и 23 мг/кг, соответственно. По мере удаления от промплощадки завода содержания Cu и Zn в легкообменной фракции снижаются, но возрастают их доли в потенциально подвижных формах.

Благодаря повышенному содержанию Cu в органической и железо-марганцевой фракциях в почвах дачных участков г. Свирска, концентрация ее в наиболее закрепленной остаточной фракции здесь самая низкая (52 %) по сравнению с другими участками. Как и в случае с As и Рb, это указывает на увеличение резервной доли Cu в пахотных почвах города. Содержания Zn в нерастворимом остатке почв дачных участков значительно выше – до 70 %, а суммарное количество его в потенциально подвижных формах – 27,2 %. Среди них бóльшая часть приходится на железо-марганцевую фракцию (15,2 %). В пахотных почвах Усть-Ордынского округа Cu и Zn находятся преимущественно в малоподвижной остаточной форме.

Хром. В изученных почвах высоко содержание Cr в остаточной фракции – 85-95 %, а в легкообменной – ниже ПДК для его водорастворимых форм (ПДК 6 мг/кг, Контроль..., 1998). Среди потенциально подвижных форм в почвах преобладают Cr-органические соединения.

Ртуть в почвах находится преимущественно в органической и прочносвязанной фракциях (рис. 3), что свидетельствует о достаточно прочной фиксации ее компонентами почвы. Высокое содержание Hg в органической фракции указывает на важную роль в ее миграции гумусовых веществ почвы. Максимальная концентрация Hg в органической фракции установлена в почвах окрестностей г. Усолье-Сибирское (участок 3).

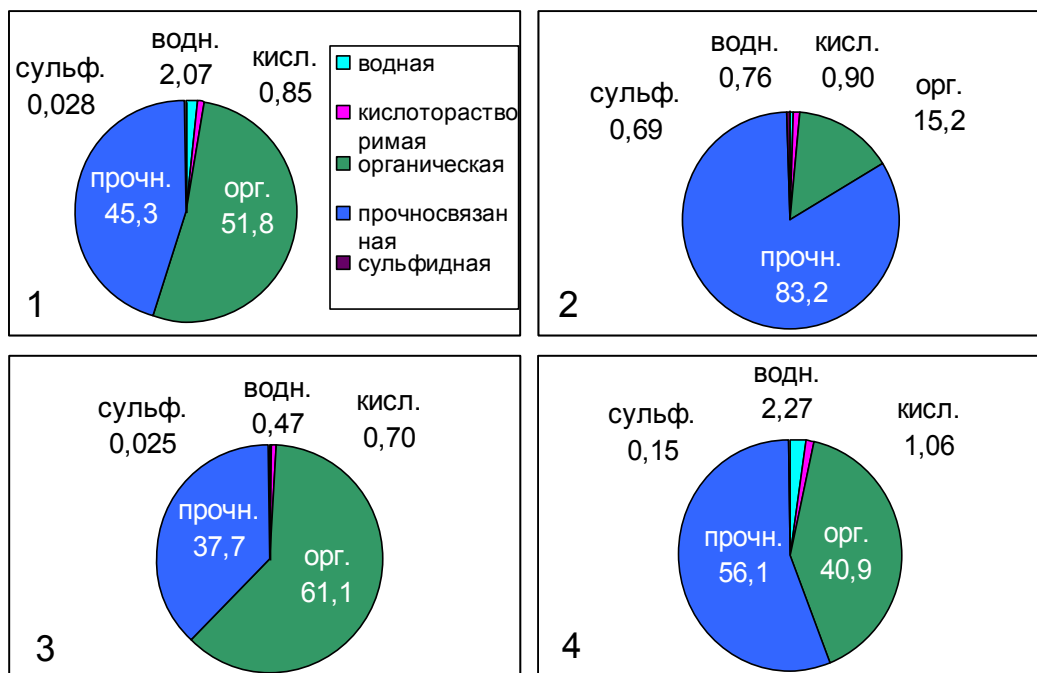


Рис. 3. Содержание ртути в различных фракциях верхнего горизонта почв, процент от суммы фракций

Участки: 1 – в 1,5 км от цеха ртутного электролиза (гор. A_0+A), 2 – в 2 км от цеха (гор. A_0+A), 3 – окрестности г. Усолья-Сибирского (гор. A_0+A), 4 – в 30 км от г. Усолье-Сибирское (гор. A_{max}).

Количество Hg в наиболее закрепленной – сульфидной – фракции ниже предела обнаружения, за исключением почвы участка 2. Увеличение доли Hg в прочносвязанной и сульфидной фракциях здесь обусловлено преобладанием восстановительных процессов из-за периодического подтопления почвы. В результате Hg восстанавливается до сульфидной HgS и металлической Hg⁰ форм.

Концентрации Hg в водо- и кислоторастворимой фракциях почв незначительны. Прослеживается тенденция снижения концентраций (в мг/кг) водорастворимой Hg в почвах при удалении от цеха ртутного электролиза. Процентная доля Hg в этой фракции в почвах в 30 км от г. Усолье-Сибирское (участок 4) сопоставима с таковой в почвах «Усольехимпрома» (участок 1). Это указывает на то, что процессы миграции Hg в водорастворимой форме могут с одинаковой интенсивностью происходить как в загрязненной, так и относительно чистой почве, независимо от массового содержания Hg (в мг/кг) в этой фракции. Такая же тенденция прослеживается и по другим фракциям Hg.

Алюминий, натрий, калий и железо в изученных почвах находятся главным образом в остаточной фракции. Небольшая часть Na, K и Fe находится в легкообменной форме, которая при удалении от завода увеличивается. Согласно данным (Барбер, 1988) количество подвижного K, необходимого для нормального роста растений, составляет 150 мг/кг. Содержание легкообменного K в почвах г. Свирска и окрестностей находится в пределах 12,1-43 мг/кг, что указывает на недостаток его для растений. В почвах Усть-Ордынского округа содержание K в легкообменной фракции на порядок выше.

Не установлено влияния pH почв на подвижность Fe. В техноземах в 5 м от отвалов завода при pH 4,6 подвижность его минимальна. В почвах с нейтральными и слабощелочными значениями pH Fe более подвижно. В данном случае имеют значение окислительно-восстановительные условия в почвах. В зоне распространения мышьяковых отвалов преобладают процессы окисления, способствующие осаждению Fe, в связи с чем в техноземах установлены максимальные его концентрации в железо-марганцевой и остаточной фракциях.

Марганец. Неблагоприятные для образования подвижных форм Mn факторы (окислительные условия, нейтральные и щелочные значения pH, высокие содержания подвижных Ca и Mg) являются причиной низких содержаний подвижного и биодоступного Mn в почвах г. Свирска. В пахотных почвах Усть-Ордынского округа миграция Mn в легкообменной форме (17,4 %) достаточно высока.

Для Mn характерно вхождение в состав органических соединений почв, особенно при удалении от завода. Это связано с естественными процессами в почвах – значительная часть биофильного Mn возвращается в почву с растительными остатками, в дальнейшем подвергающихся минерализации и гумификации. Концентрации Mn в железо-марганцевой фракции также возрастают по мере удаления от завода, что указывает на увеличение роли оксидов и гидроксидов Mn в сорбции элементов в менее загрязненных почвах.

Кальций обладает наибольшей подвижностью в почвах среди макроэлементов. Содержание его в легкообменной форме увеличивается по мере удаления от промплощадки завода. Самая высокая доля легкообменного Ca характерна для почв Усть-Ордынского округа (37,7 %).

Магний в изученных почвах также достаточно подвижен. Вместе с тем высока его доля в нерастворимом остатке – 75-90,5 %. В почвах дачных участков г. Свирска возрастает содержание Mg-органических соединений.

Фосфор. Содержание легкообменного Р в почвах невысокое – 19,8-73,5 мг/кг с максимумом в техноземах и в почвах дачных участков г. Свирска. Нормальным содержанием подвижного Р для интенсивного земледелия считается 131 мг/кг (Иванов, 1994), что указывает на дефицит биодоступного Р в почвах г. Свирска. При удалении от мышьякового завода в почвах существенно увеличивается содержание Р в потенциально подвижных фракциях, особенно в почвах дачных участков. В пахотных почвах значительны содержания Р-органических соединений, что может быть связано с применением органических удобрений, гумификацией растительных остатков.

Глава 5. Миграция химических элементов в системе «почва-растение»

Бионакопление химических элементов зависит от многих факторов. Разные виды растений, произрастающие на одних участках, накапливают различные концентрации элементов. Паслен сладко-горький и кровохлебка аптечная, выросшие вблизи мышьяковых отвалов, резко отличаются содержаниями элементов (табл. 3).

Таблица 3

Средние содержания химических элементов в дикорастущих растениях (мг/кг сухой массы) и коэффициенты биологического поглощения

Элемент	г. Иркутск	г. Свирск, вблизи мышьяковых отвалов		г. Свирск, окрестности	Фоновые содержания в травах ³
	Паслен (n=3) ¹	Паслен (n=3)	Кровохлебка (n=3)	Кровохлебка (n=7)	
As	0,37	641 (0,10) ²	52 (0,008)	0,075 (0,003)	–
Cd	0,075	4,28 (0,24)	0,15 (0,008)	0,01 (0,051)	0,07-0,27
Pb	0,98	32,8(0,0003)	4,1(0,00004)	2,3 (0,066)	0,36-3,3
Cu	3,3	38,1 (0,06)	4,5 (0,007)	4,2 (0,14)	1,8-10,5
Zn	19,1	237 (0,12)	22 (0,01)	31,7 (0,38)	12-47
Cr	1,12	5,63 (0,04)	3,6 (0,028)	1,5 (0,017)	–
Ni	1,0	2,98 (0,05)	1,8 (0,031)	0,92 (0,012)	0,13-1,7
Co	0,24	0,7 (0,027)	0,28 (0,011)	0,38 (0,021)	0,03-0,27
Fe	500	1200(0,012)	350 (0,004)	240 (0,005)	18-1000
Al	260	830 (0,011)	290 (0,004)	210 (0,004)	–
Mn	30	90 (0,14)	30 (0,047)	80 (0,10)	17-334
Mg	2300	7200 (0,47)	2100 (0,14)	4100 (0,27)	–
Ca	10900	43000 (1,5)	11000 (0,38)	18100 (1,10)	–
Na	–	1100 (0,13)	740 (0,09)	40 (0,003)	–
K	15900	13000(0,94)	9300 (0,67)	13800 (0,93)	–
P	1200	2000 (2,1)	800 (0,83)	18300 (27,6)	–

¹(n) – количество проб. ²Здесь и далее в скобках указаны коэффициенты биологического поглощения. ³По данным А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас (1989).

Паслен, обладающий высокой толерантностью к элементам-токсикантам, накапливает их по типу «безбарьерных» растений. Максимальное накопление Са пасленом вблизи отвалов может быть защитной реакцией растения на экстремальные

условия среды произрастания. В растениях Са проявляет антагонизм со многими ТМ, участвуя в их иммобилизации (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Рост концентраций Na и Al в растениях техногенной зоны является нарушением микроэлементного баланса.

As и ТМ накапливаются в основном в вегетативных органах растений, так как поступление элементов-токсикантов в репродуктивные органы ограничено внутренними механизмами саморегуляции растения. Биофильные элементы К и Р, напротив, аккумулируются в ягодах паслена, что является классическим примером распределения жизненно важных элементов в органах растений.

В окрестностях г. Свирска на фоне снижения валовых концентраций и подвижности As и ТМ, уменьшается их бионакопление (табл. 3). В березовом соке (табл. 4), как и в случае ее вегетативных органов, отобранных в окрестностях г. Свирска, максимально накапливается As по сравнению с другими участками. Аккумуляция Рb в соке является общей тенденцией для окрестностей промышленных городов.

Таблица 4

Средние содержания химических элементов в березовом соке, мкг/л

Место отбора	As	Cd	Pb	Cu	Zn	Hg	Cr	Al	Mn
г. Свирск (n=11)	0,72	0,90	2,63	16,8	1750	0,0017	0,69	404	2940
г. Ангарск (n=5)	0,08	1,55	1,65	23,1	1890	0,0016	0,25	430	6630
г. Усолье-Сибирское (n=4)	0,14	1,03	2,13	19,5	1980	0,0018	0,28	329	3500
26 км от оз. Байкал (n=2)	0,19	1,01	0,41	114,3	1173	0,0012	0,07	157	6389

Грибы можно отнести к организмам-аккумуляторам химических элементов. Содержания Cd, Cu, Zn, а также К и Р в грибах превышают содержания их в почвах. Произрастающие в окрестностях г.Свирска грибы содержат повышенные, относительно Усть-Ордынского округа, концентрации основных загрязнителей – As, Рb, Cu, Zn.

Повышенное бионакопление As характерно и для овощей г. Свирска, выращенных на дачных участках в 200-500 м от мышьякового завода (табл. 5).

Таблица 5

Средние содержания химических элементов в сельскохозяйственных растениях (мг/кг сухой массы) и коэффициенты биологического поглощения

Элемент	Картофель		Морковь	
	г. Свирск (n=12)	г. Усолье-Сибирское (n=2)	г. Свирск (n=2)	г. Усолье-Сибирское (n=2)
As	0,41 (0,004)	0,05 (0,011)	2,34 (0,016)	0,05 (0,011)
Cd	0,023 (0,056)	0,028 (0,059)	0,050 (0,11)	0,022 (0,050)
Pb	0,084 (0,0004)	0,110 (0,002)	0,18 (0,0008)	0,13 (0,002)
Cu	3,65 (0,062)	3,30 (0,11)	2,25 (0,035)	3,70 (0,11)
Zn	17,0 (0,12)	24,5 (0,14)	22,5 (0,13)	25,0 (0,14)
Ni	0,58 (0,012)	0,93 (0,015)	2,05 (0,034)	0,60 (0,010)
Mg	934 (0,065)	1150 (0,091)	870 (0,060)	1220 (0,098)
Ca	258 (0,012)	240 (0,010)	1850 (0,080)	2300 (0,097)
Na	93 (0,006)	253 (0,013)	5040 (0,33)	4400 (0,23)
K	19000 (1,19)	30000 (1,85)	28600 (1,67)	29200 (1,80)
P	8700 (8,90)	21000 (51,4)	16800 (10,0)	23500 (55,2)

Установлена положительная корреляция ($R = 0,82$, $P = 0,023$) между содержанием легкообменного As в этих почвах и концентрациями его в картофеле (рис. 4).

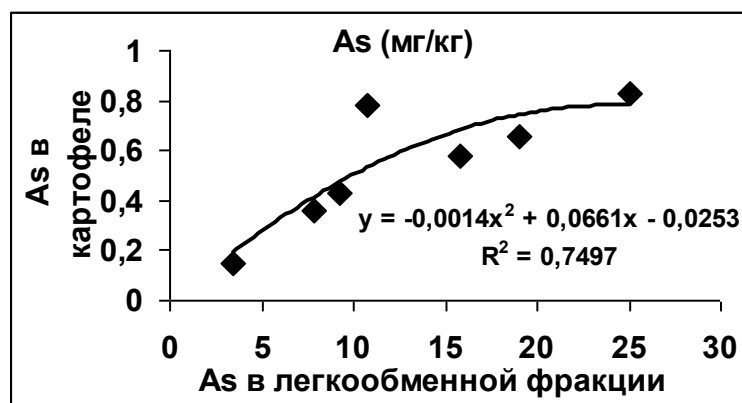


Рис. 4. Зависимость содержаний As в легкообменной фракции пахотных почв (горизонт $A_{\text{пах}}$) и концентрациями его в картофеле, мг/кг (сухой массы)

Особенностью бионакопления элементов в условиях слабого загрязнения почв (окрестности г. Свирска) является существенное увеличение коэффициентов биологического поглощения не только элементов с повышенной и высокой биофильностью (Cu, Zn, Co, Mn, Mg, Ca, K, P), но и биотоксичных (Cd, Pb) по сравнению с участком вблизи мышьяковых отвалов (табл. 3, кровохлебка). Такая же закономерность установлена для культурных растений (табл. 5). Это указывает на увеличение интенсивности миграции химических элементов из почв в растения на фоне низких их содержаний в почвах. В условиях загрязнения большую роль могут играть внутренние механизмы защиты растений от чрезмерного накопления элементов-токсикантов.

Особенности бионакопления ртути. Повышенная аккумуляция Hg растениями характерна для территории «Усольехимпрома» и окрестностей г. Усоля-Сибирского по сравнению с окрестностями г. Свирска, что подтверждается коэффициентами биологического поглощения (табл. 6).

Таблица 6

Средние содержания ртути в дикорастущих растениях (мг/кг сухой массы) и коэффициенты биологического поглощения

Место отбора	Травы	Листья березы	Ветви березы
«Усольехимпром»	0,065 (0,16) n=9	0,032 (0,91) n=7	0,013 (0,44) n=6
Окрестности	г. Усолье-Сибирское	0,082 (0,18) n=4	0,029 (0,21) n=4
	г. Свирск	0,010 (0,47) n=3	0,010 (0,34) n=7

Содержания Hg в травах окрестностей г. Усолье-Сибирское повышены относительно трав территории «Усольехимпрома». Дополнительным источником Hg для почв окрестностей города является ТЭЦ, расположенная рядом с «Усольехимпромом». Ртуть, поступающая с выбросами ТЭЦ, связывается минеральными и органическими компонентами почв. Именно Hg-органические формы могут являться одним из основных источников Hg для растений. Установлена прямая связь ($R = 0,91$, $P = 0,033$) между содержанием Hg в органической фракции почв и средними содержаниями Hg в травах (рис. 5). Этого не наблюдается для других ее фракций и валовых содержаний в почвах.

Данный факт указывает на важную роль органических соединений Hg в миграции ее в системе «почва-растение».

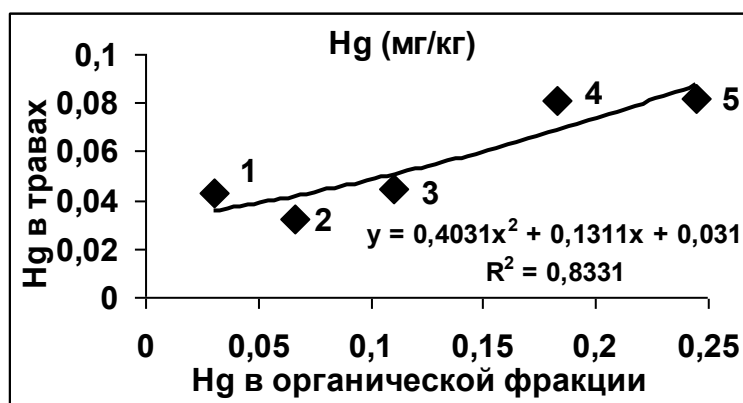


Рис. 5. Зависимость содержаний Hg в органической фракции почв и концентрациями ее в травах, мг/кг (сухой массы)

Участки: 1, 2, 3 – в 1,5 км от цеха ртутного электролиза, 4 – в 2 км от цеха, 5 – окрестности г. Усолье-Сибирское.

Ртуть, как и другие ТМ, накапливается преимущественно в вегетативных органах растений (табл. 7). Коэффициенты биологического поглощения Hg для растений, отобранных на участке в 30 км от г. Усолье-Сибирское, в ряде случаев выше, чем для растений территории «Усольехимпром», что указывает на более интенсивную миграцию Hg из почв в растения в условиях слабого загрязнения.

Таблица 7

Средние содержания ртути в разных органах растений и в почве (мг/кг сухой массы), коэффициенты биологического поглощения

Органы растений	«Усольехимпром»	30 км от г. Усолье-Сибирское
<i>Береза:</i> листья	0,034 (0,07)	0,017 (0,02)
ветви	0,025 (0,04)	0,011 (0,01)
семена	0,024 (0,05)	0,011 (0,12)
тонкая кора	0,081 (0,21)	0,021 (0,22)
одревесневшая кора	0,202 (0,44)	0,022 (0,23)
<i>Горошек:</i> листья	0,124 (0,27)	0,024 (0,25)
стебли	0,012 (0,03)	0,008 (0,08)
стручки	0,010 (0,02)	0,010 (0,11)
семена	0,014 (0,03)	0,006 (0,06)
корни	0,057 (0,12)	0,016 (0,17)
<i>Тысячелистник:</i> листья	0,062 (0,17)	0,024 (0,25)
стебли	0,010 (0,36)	0,010 (0,11)
цветы	0,028 (0,08)	0,011 (0,12)
корни	0,029 (0,08)	0,010 (0,11)
<i>Почва</i>	0,410	0,095

Грибы значительно накапливают Hg (табл. 8), как и другие ТМ. В большинстве случаев содержания Hg в грибах на 1–2 порядка выше, чем в почвах. На интенсивное

поглощение Hg грибами указывают высокие коэффициенты биологического поглощения, особенно на территории «Усольехимпрома».

Таблица 8

Содержания ртути в высших грибах (мг/кг сухой массы)
и коэффициенты биологического поглощения

Группа грибов и место отбора	Среднее	Минимальное	Максимальное
Пластинчатые «Усольехимпром» (n=7)	1,15 (13,5)	0,14 (0,47)	5,40 (31)
Трубчатые «Усольехимпром» (n=4)	0,29 (2,1)	0,12 (0,32)	0,59 (7,1)
Пластинчатые г. Усолье-Сибирское (n=3)	0,52 (5,9)	0,34 (2,20)	0,70 (8,4)
Пластинчатые г. Свирск (n=6)	0,19 (5,6)	0,01 (0,14)	0,53 (16)

Концентрации Hg в *сельскохозяйственных растениях*, отобранных в гг. Усолье-Сибирское и Свирск значительно ниже допустимых норм, которые по Л. И. Кузубовой и др. (2000) составляют 0,02 мг/кг. Относительно небольшие содержания Hg в овощах могут быть обусловлены невысокими ее содержаниями в биодоступных формах на фоне низких валовых концентраций в пахотных почвах.

Выводы

На основе проведенных исследований установлены закономерности биогеохимической трансформации почвенно-растительного покрова Приангарья под влиянием техногенного загрязнения. Основные выводы сводятся к следующему:

1. Максимальные содержания As, Cd, Pb, Hg, Cu, Zn, Cr установлены в почвах промплощадки бывшего мышьякового завода в г. Свирске. В почвах этой территории наблюдаются высокие концентрации Fe, обусловленные окислением железосодержащих сульфидов, их выщелачиванием и переотложением в виде гидроксида Fe.

2. По мере удаления от импактной зоны загрязнения до 3,5 км при общем снижении валовых содержаний ТМ, средние и максимальные концентрации As в почвах превышают ориентировочно допустимые нормы в 2,3 и 6,2 раза, соответственно.

3. Главной особенностью миграции химических элементов в почвах г. Свирска является увеличение их содержаний в наиболее подвижной легкообменной и резервных (карбонатной, органической, железо-марганцевой) фракциях при удалении от мышьякового завода. Исключением является Cd, максимально подвижный в технозомах.

4. В пахотных почвах г. Свирска, расположенных в зоне техногенного влияния, установлено высокое содержание As, Pb и Cu в резервных фракциях, что имеет важное значение в связи с возможностью трансформации потенциально подвижных форм As, Pb и Cu в растворимые и биодоступные соединения.

5. Иммобилизация химических элементов происходит при участии различных компонентов почвы. Большая часть As и ТМ связана почвенными минералами в труднорастворимые соединения. В максимально загрязненных технозомах в 5 м от отвалов мышьякового завода в сорбции As важная роль принадлежит железо-марганцевым гидроокислам, Cd – карбонатам почв. Pb, Cu, Cr в изученных почвах помимо труднорастворимых комплексов преобладают в составе органических соединений почв, Zn – в железо-марганцевых гидроокислах.

6. Al, Na, Fe, K, Mg в почвах главным образом находятся в труднорастворимых минеральных формах. Mn и P накапливаются в органической форме, особенно в

пахотных почвах. В миграции Са большую роль играют его легкорастворимые соединения. В изученных почвах установлен дефицит подвижных форм Р и К, являющихся важными элементами питания растений.

7. Несмотря на преобладание процессов иммобилизации элементов в почвах, в условиях техногенного загрязнения содержания их в легко растворимых и биодоступных формах, выраженные в мг/кг, достаточно высокие. Это приводит к сильной аккумуляции элементов-токсикантов в растениях, произрастающих вблизи мышьяковых отвалов. На примере дикорастущего растения – паслена сладко-горького *Solanum dulcamara* L. – обладающего низкими барьерными свойствами и высокой толерантностью по отношению к элементам-токсикантам и способного накапливать максимально высокие их концентрации, показана перспективность использования растений для фитоиндикации и ремедиации техногенно загрязненных почв.

8. Повышенное накопление As и ТМ характерно и для овощей г. Свирска, выращиваемых в зоне техногенного влияния. В поступлении As из почв в сельскохозяйственные растения первостепенное значение имеют его наиболее подвижные легкообменные формы, обладающие высокой биодоступностью. Это подтверждается коэффициентами корреляции ($R = 0,82$, $P = 0,023$) между содержанием легкообменного As в почвах и содержаниями его в овощах.

9. Среди изученных живых организмов грибы обладают наибольшей способностью аккумулировать элементы-токсиканты даже при относительно низких концентрациях элементов в почвах, характерных для окрестностей г. Свирска. Древесные и травянистые растения в этих условиях концентрируют As и ТМ значительно меньше, чем грибы.

10. На фоне высоких содержаний As и ТМ в почвах уменьшается бионакопление необходимых элементов питания К, Mn, Р по сравнению со слабо загрязненным участком в окрестностях города, что указывает на наличие микроэлементного дисбаланса в растениях техногенных зон.

11. Березовый сок, отражая специфику загрязнения почв в окрестностях промышленных городов, содержит повышенные концентрации основных элементов-загрязнителей (As, Pb) относительно территорий, где влияние техногенеза незначительно.

12. Изучение форм нахождения Hg показало, что этот элемент находится в почвах преимущественно в органических и прочносвязанных минеральных формах. Прочносвязанная Hg представляет собой металлическую Hg^0 и ртуть в решетке минералов, поэтому она мало доступна для растений. Органические соединения Hg имеют решающее значение в её миграции и биодоступности. На это указывают положительные коэффициенты корреляции ($R = 0,91$, $P = 0,033$) между содержанием ртути в органической фракции почв и концентрациями ее в травах.

13. Основное бионакопление As и ТМ происходит в вегетативных органах растений, минимальное – в ягодах и семенах. В последних максимально аккумулируются биофильные элементы Р и К, что является классическим примером распределения жизненно важных элементов по органам растений.

14. Главной особенностью миграции и биопоглощения в условиях г. Свирска является накопление основного элемента-загрязнителя – мышьяка – во всех объектах исследования. Такая же закономерность установлена для ртути, что показано на примере миграции ее в системе «почва-растения» на территории г. Усолья-Сибирского и его окрестностей.

Список основных публикаций

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ

1. Белоголова Г.А., **Гордеева О.Н.**, Коваль П.В., Джао К.Х., Гао Г.Л. Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в техногенно трансформированных черноземах Южного Приангарья и Северо-Восточного Китая // Почвоведение. – 2009. – № 4. – С. 1-12.

2. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Гребенщикова В.И. Распределение и миграция тяжелых металлов и мышьяка в системе «почва-растение» в условиях г. Свирска (Южное Прибайкалье) // Проблемы региональной экологии. – 2010. – № 3. – С. 108-113.

3. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Формы нахождения и особенности миграции химических элементов в почвах г. Свирска в условиях техногенного загрязнения (Южное Прибайкалье) // Инженерная экология. – 2011. – № 4. – С. 11-29.

4. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Андрулайтис Л.Д. Биогеохимические особенности миграции ртути в системе «почва-растение» Южного Прибайкалья // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология, экология». – 2012. – № 3. – Т. 5. – С. 23-32.

5. Белоголова Г.А., Соколова М.Г., **Гордеева О.Н.** Влияние ризосферных бактерий на миграцию и биодоступность тяжелых металлов, мышьяка и фосфора в техногенно-загрязненных экосистемах // Агрохимия. – 2013. – № 6. – С. 83-92 (выходит в печать).

Статьи

6. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Биогеохимические особенности микроэлементного состава молока сельскохозяйственных и техногенных районов Южного Прибайкалья / Материалы Межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых «Человек: здоровье и экология» (29-30 сентября) / Бюллетень Восточно-Сибирского научного центра СО РАМН. – 2008. – № 2 (60). – С. 59-60.

Материалы и тезисы конференций

7. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Лопатовская О.Г., Копылова Л.И. Содержание тяжёлых металлов в березовом соке Иркутско-Черемховского промышленного района // Материалы Регионального молодёжного академического форума «Молодёжь и наука Сибири» (17-19 ноября). – Чита, 2003. – С. 234-236.

8. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Лопатовская О.Г., Копылова Л.И. Содержание ртути в пищевых продуктах Иркутско-Черемховского промышленного района // Материалы 2-ой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Экология и научно-технический прогресс». – Пермь, 2003. – С. 348-352.

9. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Содержание макро- и микроэлементов в берёзовом соке и питьевой воде (Иркутско-Черемховский промышленный район) // Материалы пятой Международной многопрофильной конференции молодых учёных и аспирантов «Актуальные проблемы современной науки» (5-8 сентября). – Самара, 2004. – С. 143-145.

10. **Гордеева О.Н.** Макроэлементы в почвах и растениях техногенных и фоновых ландшафтов Южного Приангарья // Материалы Международной научной конференции «Проблемы устойчивого функционирования водных и наземных экосистем» (9-12 октября). – Ростов-на-Дону, 2006. – С. 88-90.

11. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Особенности миграции тяжелых металлов в техногенных черноземах Приангарья / Материалы Третьей Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (27-29 ноября). – Новосибирск, 2006. – С. 57-58.

12. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. К вопросу о методике изучения форм нахождения тяжелых металлов в почвах на примере Южного Прибайкалья и Северо-Восточного Китая // Материалы II Международной научной конференции «Современные проблемы загрязнения почв» (28 мая – 1 июня). – Москва, 2007. – С. 146-149.

13. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Формы нахождения тяжелых металлов в черноземах Южного Прибайкалья и фаоземах Северо-Восточного Китая // Материалы Всероссийской конференции «Геохимия эндогенных процессов и окружающей среды» (2-6 апреля). – Иркутск, 2007. – С. 147-151.

14. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Матяшенко Г.В. Техногенные экогеохимические аномалии в городе Иркутске // Материалы Международной молодежной научной конференции «Горные территории – экологические проблемы городов» (29-30 мая). – Ереван, 2007. – С. 89.

15. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Особенности распределения химических элементов в почвах и овощах техногенных и сельскохозяйственных ландшафтов Южного Прибайкалья / Материалы Четвертой Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле (1-3 декабря). – Новосибирск, 2008. – С. 92-94.

16. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Матяшенко Г.В. Формы нахождения и биодоступность тяжелых металлов в природно-техногенных ландшафтах Южного Приангарья / Материалы IX научного совещания по прикладной географии (13-17 апреля). – Иркутск, 2009. – С. 128-130.

17. **Гордеева О.Н.** Особенности распределения и миграции тяжелых металлов и мышьяка в почвах г. Свирска (Южное Прибайкалье) / Материалы XIV Международного научного симпозиума им. Академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (5-9 апреля). – Томск, 2010. – С. 328-330.

18. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Миграция ртути в почвах и растениях техногенных ландшафтов Иркутской области / Материалы Всероссийской научной конференции «Геохимия ландшафтов и география почв» (4-6 апреля). – Москва, 2012. – С. 90-93.

19. Белоголова Г.А., **Гордеева О.Н.**, Соколова М.Г. Миграция и биодоступность тяжелых металлов и мышьяка под влиянием ризосферных бактерий в системе «почва-растение» / Материалы Всероссийской научной конференции «Геохимия ландшафтов и география почв» (4-6 апреля). – Москва, 2012. – С. 55-57.

20. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А. Распределение ртути в почвах и растениях г. Свирска / Материалы Третьей Всероссийской научной конференции «Экологический риск и экологическая безопасность» (24-27 апреля). – Иркутск, 2012. – Т. 2. – С. 28-30.

21. **Гордеева О.Н.**, Белоголова Г.А., Рязанцева О.С. Особенности биогеохимии ртути в почвенно-растительном покрове Приангарья / Материалы XXV Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика» (23-28 апреля). – Иркутск, 2013. – С. 115-116.

Подписано к печати 10.05.2013 г.
Формат 60*84/16. Объем 1,4 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 589.
Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН.
664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1.

