На правах рукописи

Сибиркина Альфира Равильевна

БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СОСНОВЫХ БОРАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПРИИРТЫШЬЯ

03.02.08 – экология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Научный консультант:
доктор биологических наук,
профессор М.С. Панин

005552534

18 СЕН 2014

Омск, 2014

Работа выполнена на кафедре общей экологии
Челябинского государственного университета

Официальные оппоненты: Барановская Наталья Владимировна, доктор биологических наук, профессор Национального исследовательского Томского политехнического университета

Дженбаев Бекмамат Мурзакматович, доктор биологических наук, профессор, директор Биолого-почвенного института НАН КР

Сысо Александр Иванович, доктор биологических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН Институт почвоведения и агрохимии СО РАН

Ведущая организация: Институт экологии растений и животных УрО РАН

Защита состоится «24» октября 2014 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.177.05 при ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет» по адресу: 644099, г. Омск, наб. Тухачевского, 14.

Телефон/факс: (3812) 23-12-20, e-mail: kolpakova@omgpu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного педагогического университета по адресу: г. Омск, наб. Тухачевского, 14.

Автореферат разослан «9» сентября 2014 г.
и размещен на сайте ВАК РФ www.vak.ed.gov.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета Т.Ю. Колпакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современное загрязнение окружающей среды, в том числе и тяжёлыми металлами (ТМ), возрастает с каждым годом, и поэтому решение многих экологических вопросов становится очень актуально (Осовецкий, Меньшикова, 2006; Цыганков, 2008). Определенный интерес представляют данные о биоаккумуляции ТМ почвами, растениями и грибами лесных ландшафтов (Добровольский, 1983), которые играют особую роль глобального геохимического регулятора циклических массопотоков ТМ. В то же время современные лесные массивы подвергаются мощному антропогенному воздействию, например, в результате пожаров, интенсивной бесконтрольной их вырубки, что, несомненно, приводит к нарушению биогеохимического круговорота веществ (Балбышев, 1990; Букштынов и др., 1981; Сокольский, 2008).

Все выше сказанное в полной мере относится и к реликтовым сосновым борам Семипалатинского Прииртышья, выполняющим климаторегулирующие, санитарно – гигиенические, почвозащитные функции. Территория сосновых боров не подвержена широкомасштабному техногенному загрязнению, однако, она расположена на границе крупных промышленных комплексов Восточно-Казахстанской области, где сосредоточены горно-металлургические, горнодобывающие, горно-перерабатывающие, энергетические, химические и другие промышленные предприятия, которые причиняют экологический ущерб в той или иной мере.

На сегодняшний день исследованы особенности аккумуляции ТМ почвами и растениями Семипалатинского Прииртышья (Панин, 1999). В 60-х - начале 70-х годов 20 века проводили исследование почв Семипалатинской области, в которую входила территория соснового бора (Колходжаев и др., 1968). В ходе исследования был изучен физико-химический, морфологический и гранулометрический состав, содержание гумуса, азота и катионно-анионный состав почв. Однако, вопрос о накоплении тяжелых металлов боровыми песками, растениями и грибами реликтовых сосновых лесов Семипалатинского Прииртышья является малоизученным.

Почвенный покров, растения и грибы сосновых боров заслуживают пристального внимания как объект экологического мониторинга, изучение биогеохимических особенностей растительного покрова является частью комплексных ландшафтно-геохимических исследований территории Семипалатинского Прииртышья.

Цель работы: изучить биогеохимические закономерности содержания и распределения ряда тяжелых металлов в боровых песках, растениях и грибах сосновых боров Семипалатинского Прииртышья. В связи с этим были поставлены следующие задачи.

Задачи исследования:

1. Определить фоновый уровень содержания и распределения тяжелых металлов в боровых песках, дикорастущих растениях и грибах сосновых боров Семипалатинского Прииртышья и оценить его с экологических и гигиенических позиций.

2. Изучить валовое содержание тяжелых металлов (Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Cr, Ni, V, Be, Sr, Mn) и подвижных (кислоторастворимой, обменной и водорастворимой) форм их соединений в боровых песках сосновых боров Семипалатинского Прииртышья и выявить факторы, определяющие поведение тяжелых металлов в них.

3. Изучить степень участия растений в изменении соотношения элементов в верхних горизонтах боровых песков по сравнению с почвообразующими породами.

4. Исследовать продуктивность древостоя (запас древесины) сосны обыкновенной, установить класс бонитета, класс жизненности, рассчитать массу тяжелых металлов, вовлеченных в биогеохимический круговорот надземной фитомассой деревьев сосны обыкновенной.

5. Рассчитать интенсивность биологического поглощения тяжелых металлов в органах и тканях различных видов дикорастущих растений сосновых боров Семипалатинского Прииртышья.

6. Установить степень корреляционной связи и вывести уравнения регрессионной зависимости между подвижными формами соединений тяжелых металлов в боровых песках в зависимости от их валового содержания, а также между валовым содержанием и подвижными формами тяжелых металлов в боровых песках и содержанием их в грибах и растениях. Установить корреляционные связи между металлами в различных надземных и подземных органах травянистых растений.

7. Установить геохимическую структуру и формулу геохимической специализации почвенного и растительного покрова сосновых боров Семипалатинского Прииртышья.

8. На основании полученных экспериментальных данных о содержании и распределении тяжелых металлов в боровых песках, растениях и грибах представить региональную биогеохимическую оценку состояния сосновых боров Семипалатинского Прииртышья.

Научная новизна

Диссертация является первой обобщающей работой, в которой дана комплексная оценка эколого-биогеохимического состояния боровых песков, растений и грибов сосновых боров Семипалатинского Прииртышья.

В ней впервые:

- определены уровни содержания, выявлены основные закономерности распределения тяжелых металлов в боровых песках, растениях и грибах, выявлены ведущие факторы, определяющие поведение тяжелых металлов в них;

- доказано, что изученные боровые пески относятся к категории фоновых почв, для которых существует достоверно высокая прямая корреляционная зависимость между валовым содержанием и подвижными формами тяжелых металлов в них;

- рассчитана масса тяжелых металлов, вовлеченных в биогеохимический круговорот надземной фитомассой древостоя сосны обыкновенной.

- выведены формулы геохимической специализации хвойных и лиственных пород деревьев, однодольных и двудольных травянистых растений, грибов сосновых боров Семипалатинского Прииртышья по отношению к тяжелым металлам.

Теоретическая и практическая значимость исследования

Изучение биогеохимических особенностей растительного и грибного покрова в отношении накопления и распределения тяжелых металлов входит в программу комплексных мониторинговых исследований территории Семипалатинского Прииртышья.

Полученные данные служат основой при изучении степени антропоустойчивости природных комплексов, оценки региональных биологических ресурсов и степени их нарушенности.

Изучение химического (элементного) состава фитоценозов на фоновых территориях служит базовым критерием, указывающим на естественный состав элементов.

Результаты исследования могут быть использованы в мониторинговых биоиндикационных исследованиях состояния окружающей среды, связанных с оценкой миграционных потоков тяжелых металлов в экосистемах, диагностированием изменений питательного статуса фитоценозов и нарушений жизненного состояния растительных организмов, а также при разработке мероприятий по биоремедиации загрязненных территорий.

Полученные материалы об эколого-биогеохимическом состоянии боровых песков, растительного и грибного покрова реликтовых сосновых боров Семипалатинского Прииртышья использованы при чтении курсов лекций «Мониторинг окружающей среды», «Экология растений» в Семипалатинском государственном университете имени Шакарима (г. Семей, Республика Казахстан), а также при чтении эколого-геохимических дисциплин в Челябинском государственном университете, при проведении учебно-полевых практик для студентов и магистрантов экологических специальностей.

Положения, выносимые на защиту

1. Особенности элементного состава боровых песков сосновых боров Семипалатинского Прииртышья определены содержанием металлов в почвообразующих породах, биогеохимическими процессами, протекающими под влиянием растений и грибов.

2. Боровые пески сосновых боров Семипалатинского Прииртышья по содержанию подвижных форм тяжелых металлов относятся к категории фоновых почв и имеют свинцово-кадмиевую специализацию элементного состава.

3. Растения и грибы сосновых боров Семипалатинского Прииртышья играют активную почвообразовательную роль, изменяя микроэлементный состав поверхностного слоя боровых песков.

4. Определяющим фактором накопления тяжелых металлов в растениях и грибах сосновых боров является удаленность от источников аэротехногенного загрязнения, физико-химические

свойства и физиологическая роль металлов в метаболических процессах, видовые особенности растений и грибов, а также содержание тяжелых металлов в почвообразующих породах, в боровых песках и атмосфере.

Апробация результатов исследования

Результаты работы доложены на III Междупарожной научно-практической конференции «Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде» (г. Семипалатинск, 2004 г.); «V Международной биогеохимической школе «Актуальные проблемы геохимической экологии» (г. Семипалатинск, 2005 г.», Международной научной конференции «Актуальные проблемы экологии и природопользования в Казахстане и сопредельных территориях» (г. Павлодар, 2007 г.); IV ежегодной научно-методической конференции преподавателей (г. Семей, 2008 г.); Международной научной конференции «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде» (г. Семей, 2008, 2010, 2012 гг.), «V Международном Совещании «Геохимия биосферы» (г. Новороссийск, 2009 г.), Международной научно-практической конференции «Высшее образование и аграрная наука – сельскому хозяйству» (г. Семипалатинск, 2009 г.), Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности» (г. Тамбов, 2013 г.); Международной заочной научно-практической конференции «Вопросы образования и науки в XXI веке» (г. Тамбов, 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» (г. Тамбов, 2013 г.); I международной заочной научно-практической конференции «Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии» (г. Москва, 2013 г.); V международной научно-практической конференции «Экологический мониторинг и биоразнообразие» (г. Ишим, 2013 г.); IV Международной научно-практической конференции «Наука и образование» (г. Мюнхен, Германия, 2013 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 39 работ, из них в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 14 статей.

Структура и объем диссертации

Текст диссертации составляет 247 страниц и включает введение, 4 главы, выводы и приложения, содержит 40 таблиц и 27 рисунков. Список литературы представлен 323 источниками, в том числе 20 – на иностранных языках.

Личный вклад автора

Диссертация содержит фактический материал, полученный лично автором в течение 2000-2012 гг. Самостоятельно выбрано направление исследования, разработаны основные подходы и методики к решению поставленных задач. Выполнены работы по сбору полевого материала, его камеральной и статистической обработке, обобщению и интерпретации данных. Доля участия автора в подготовке публикаций составила 100%.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и благодарность своим наставникам: профессору Михаилу Семеновичу Пашину (Государственный университет имени Шакарима города Семей) и профессору Сергею Федоровичу Лихачеву (Челябинский государственный университет) - за поддержку, ценные научные и методические советы при выполнении диссертационного исследования. Автор признателен членам Диссертационного совета ДМ 212.177.05 при ФГБОУ ВПО «Омский государственный педагогический университет» за предоставленную возможность публичной защиты основных результатов докторской диссертации. Выражаю искреннюю благодарность сотрудникам кафедры биологии Семипалатинского государственного университета имени Шакарима доценту Карипбаевой Н.Ш. и ст. преподавателю Полевику В.В. за активную помощь в работе по определению видов растений сосновых боров Семипалатинского Прииртышья.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АККУМУЛЯЦИИ И МИГРАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ «ПОЧВА-РАСТЕНИЯ»

На основе обобщения обширного опубликованного матерала представлены данные о распределении тяжелых металлов по поверхности почвы и влиянии различных факторов на характер их распределения, рассмотрены механизмы закрепления тяжелых металлов почвенными минералами. Указано, что степень обеспеченности почвы биологически доступными формами микроэлементов играет ключевую роль в минеральном питании растений. Представлены данные о роли растений в перераспределении тяжелых металлов, о факторах, изменяющих скорость поглощения элементов.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ

Рассмотрены основные черты растительного и почвенного покрова Семипалатинского Прииртышья. Дана физико-химическая, морфологическая и гранулометрическая характеристика боровых песков. Представлена общая характеристика лесных ресурсов Республики Казахстан, эколого-геохимическая характеристика ленточных сосновых боров Семипалатинского Прииртышья, их современное состояние, основные экологические проблемы.

ГЛАВА 3. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования по теме докторской диссертации - заключительный этап комплексного изучения эколого-химического состояния территории Семипалатинского Прииртышья, начатого автором в 1995 году. Результаты начального этапа исследований легли в основу кандидатской диссертации по теме «Техногенное загрязнение тяжелыми металлами водосборной площади бассейна Иртыша в пределах территории Казахстана» в 1999 году. Завершающим этапом работы послужило исследо-

вание биогеохимических особенностей содержания тяжелых металлов в боровых песках, растениях и грибах сосновых боров Семипалатинского Прииртышья.

Настоящие исследования проводились на различных участках сосновых боров Семипалатинского Прииртышья вдоль правобережья реки Иртыш с использованием атомно-абсорбционного и математико-статистического методов.

Отбор проб производился по территориальному принципу - географической протяженности Семипалатинских сосновых боров, согласно розе ветров и зоне прохождения следа радиоактивных выпадений ядерных испытаний 1949 года. Отбор проб проводился с 2000 по 2009 гг. в районе села Сосновка Бескарагайского района на границе с Алтайским краем Российской Федерации, в районе села Долонь, в районе села Бегень Бескарагайского района на границе с Павлодарской областью Республики Казахстан, в двух направлениях от города Семей (в районе пос. Контрольный и пос. Красный Кордон), с углублением в лес на 500-1500 м и в Бородулихинском районе - от Шульбинского водохранилища до села Бородулиха. Пробы растений отбирались в летне-осенние периоды, так как именно в это время года большинство травянистых растений находятся в фазе как цветения, так и плодоношения.

Согласно лесорастительному районированию КазНИИЛХа, исследуемые леса относятся к району сухостепных Прииртышских ленточных сосновых боров на песках Иртыша и провинции Прииртышских ленточных в ложбинах древнего стока.

В ходе исследования пробы отбирались в пяти типах боров: в сухих борах высоких, пологих и средних бугров, в западинном и равнинном борах, согласно классификации Л.Н. Грибанова и К.А. Пашковского (Грибанов, 1960; Пашковский, 1951).

При отборе, транспортировке, хранении и подготовке почвенных и растительных проб для анализа были использованы методические указания, инструкции, опубликованные во многих научных работах и утвержденные в стандартах (Охрана..., 1984; Почвы..., 1990; Геохимия ..., 1990; Жидеева и др., 1999; Ринькис, 1972; Ринькис и др., 1987; Методические..., 1981; Фурсов, 1995; Практикум..., 1995; Методы..., 1974).

Объектом исследования были выбраны боровые пески, растения и грибы сосновых боров Семипалатинского Прииртышья. При прохождении маршрута в лесных фитоценозах сосновых боров для получения обобщенно-рекогносцировочной характеристики использовали пробные площадки разного размера (10х10 м для древостоя и 1х1 м для травостоя) (Дунаев, 1999).

Исследуемая территория сосновых боров характеризуется простым древостоем, образованным деревьями примерно одной высоты (20-25 м), колебания между высотами отдельных деревьев не превышают 10-15%. Возраст древостоя подсчитывали методом годичных колец на шиях спиленных деревьев, в некоторых случаях по мутовкам, считая, что первая мутовка у сосны образуется в возрасте трех лет (Дунаев, 1999). В древостое видом-эдификатором является сосна обыкно-

венная (*Pinus sylvestris L.*) из семейства сосновые (*Pinaceae L.*). В большинстве случаев в древостое наблюдались деревья с узкими годичными кольцами, что свидетельствует о неблагоприятных экологических условиях (периодических засухах, морозах, пожарах), исследованные деревья входят в категорию средневозрастные (50-100 лет).

Производительность древостоев оценивали по бонитировочной шкале М.М. Орлова (Власова, 1986, Тюрин и др., 1956). На исследуемых участках сосновых боров дифференциацию деревьев в древостое учитывали согласно классификации Крафта (Работнов, 1974, Тюрин и др., 1956).

Расчет фитомассы деревьев сосны обыкновенной производили по формуле $1/3\pi r^2hd$, где $\pi = 3,14$; r – радиус ствола дерева; h – высота дерева; d – плотность древесины (d – плотность древесины сосны равна 0,5 т/м^2) (Денисов, 1999).

На отдельных участках сосновых боров встречаются осина обыкновенная (*Populus tremula L.*) из семейства ивовые (*Salicaceae Mirb.*) и береза повислая (*Betula pendula Roth.*) из семейства берёзовые (*Betulaceae Gray.*), являющиеся деревьями второй величины, появились в результате вторичной сукцессии, после пожаров и интенсивной вырубки. В местах отбора проб березняки обнаружены только в окрестностях г. Семей. Наибольшее количество осиновых колок обнаружено в Бескарагайском районе (Бегеньский лесхоз), наиболее близко расположенном к реке Иртыш (в 15-20 км).

Подлесок сосновых боров представлен кустарниками *Viburnum opulus L.* из семейства *Caprifoliceae Juss.*; *Caragana pumila L.* из семейства *Leguminosae Juzz.*; *Rosa cinnamomea L.*; *Crataegus laevigata (Poir.) DC.*, из семейства *Rosaceae Juzz.*, *Salix viminalis L.* из семейства *Salicaceae Mirb.* Полукустарниковый подлесок сосновых боров представлен *Rubus idaeus L.* из семейства *Rosaceae Juzz.* Кустарниковый и полукустарниковый подлески были обнаружены только в Бородулихинском районе, где лес практически примыкает к реке Иртыш.

В растительном покрове преобладают осоковые, степные дерновинные злаки и разнотравье. Всего в исследуемых районах сосновых боров было обнаружено 52 вида травянистых растений из 19 семейств, доминантными из которых является осока стоповидная, типчак и мятлик степной. Мохово-лишайниковый покров отсутствует.

Латинские названия растений даны по С.К. Черепанову и Арыстангалиеву С.А. (Арыстангалиев, 1977; Черепанов, 1981). Для определения растений использовались определители (Флора ..., 1961; Байтенов, 1999; Куликов, 2010; Рябинина, Князев, 2009).

Аналитическим исследованиям подвергались различные органы и ткани *Pinus sylvestris L.*: хвоя и побеги разного возраста; внешняя кора (корка, или ретидом), отобранная с южной и северной стороны дерева; древесина (вторичная ксилема с несколькими годичными кольцами прироста,

являющаяся вторым крупным блоком центрального цилиндра); шишки второго года жизни ((strobilus) семенной орган голосеменных растений).

Особенное внимание уделялось хвое, поскольку она выполняет ассимилирующую функцию и определяет рост и развитие других органов. Пробы хвои и побегов разбирали по возрастным фракциям (хвоя – от 1 до 4 и побеги от 1 до 7 лет); древесину, корку и шишки высушивали при комнатной температуре и измельчали. Для анализа содержания и распределения тяжелых металлов в лиственных породах деревьев и в кустарниковых растениях использовали листья, побеги текущего года, корку.

Одним из важнейших компонентов лесных экосистем являются грибы. Ввиду определенных трудностей в отборе проб мицелия грибов, аналитическим исследованиям подвергались плодовые тела 12 видов грибов, 75 % из которых представляют некоторую пищевую ценность и являются микоризообразующими. Выявление доминантных представителей макромицетов производили методом маршрутных ходов. Определение грибов проводили с помощью иллюстрированных справочников (Горленко и др., 1980; Лебедева, 1937).

В ходе работы было проанализировано 174869 образцов растений, 292 - грибов и 312 - почв (глубина взятия проб составила 0-30 см). В 144 почвенных пробах было изучено содержание тяжелых металлов на разных высотах барханов (вершина, средняя часть и основание), в качестве объекта исследования были выбраны барханы одинаковой высоты, примерно 5-6 м.

Химические элементы определяли в институте геологии и минералогии (ИГМ СО РАН) (г. Новосибирск) с применением методов атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) и электротермической атомизации для валового кадмия и для подвижных форм кадмия, свинца, меди, кобальта, никеля и бериллия. Используемые приборы: ААС модель SP9 фирмы PYE UNICAM (пламенная атомизация); ААС модель Zeeman/3030 HGA-600 фирмы PERKIN-ELMER (электротермическая атомизация). Предел обнаружения составил для растений и валового содержания в почвах 0,005-10,0 мг/кг, для подвижных форм - 0,002-0,02 мг/л.

С целью более полной агрохимической и экотоксикологической оценки почв наряду с валовым анализом были изучены подвижные формы тяжелых металлов: кислоторастворимая (1н. раствор HCl), обменная (ацетатно-аммонийный буфер с pH 4,8), водорастворимая (бидистиллированная вода).

Определение содержания гумуса проводили по методу И.В. Тюрина, физической глины – по методу Качинского, емкость поглощения – по методу Бобко – Аскинази в модификации Грабарова с окончанием по Айдиняну, pH водный – потенциометрический (Охрана..., 1985; Аринушкина, 1970; Добровольский, 1982; Лактионов и др., 1976; Метод ..., 1985; Гармаш, 1985, 1985; Ильин, 1991; Степанова, 1980; Уваров, Голеусов, 2004; Трейман, 1990).

Согласно работам Б.Б. Полынова, А.И. Перельмана и др. коэффициент биологического поглощения (КБП) рассчитывается, как отношение содержания элементов в золе растений к их валовым содержаниям в почвах, при этом КБП отражает потенциальную биогеохимическую подвижность элементов. Элементы с КБП > 1 «накапливаются» живым веществом. Остальные элементы, у которых КБП < 1, лишь «захватываются». В работе КБП был рассчитан относительно среднего содержания тяжелых металлов в боровых песках сосновых боров.

Для оценки тесноты биогеохимической связи состава живого организма с биосферой был рассчитан показатель биотичности элементов, который представляет отношение содержания элемента в органах к кларку земной коры (Глазовский, 1987; Ковальский, 1974).

Для характеристики распределения элементов между живым веществом и абиотической средой были вычислены коэффициенты накопления ($К_{Н1}$) (Ильин, Степанова, 1986) и ($К_{Н2}$) (Безель и др., 1998). Коэффициент накопления ($К_{Н1}$) - отношение концентрации тяжелых металлов в воздушно-сухой массе грибов и растений (мг/кг) к концентрации валовой и подвижных форм соединений тяжелых металлов в почве (мг/кг).

Коэффициент накопления ($К_{Н2}$) выражает отношение содержания элемента в корнях к таковому в почве: $К_{Н2} = С_{корня} : С_{почва}$, (3), где $С_{корни}$ – содержание элемента в корнях, $С_{почва}$ - содержание элемента в почве.

Для характеристики процессов перехода ТМ из корней в надземную часть травянистых растений рассчитывали коэффициент перехода ($К_{П}$), равный отношению содержания металла в надземной фитомассе к таковому в корнях (Безель и др., 1998): $К_{П} = с_{надз.\ часть} : С_{корни}$, (4), где $С_{надз.\ часть}$ – содержание элемента в надземных частях, $С_{корни}$ – содержание элемента в корнях.

Для характеристики степени прироста содержания ТМ в боровых песках относительно почвообразующих пород, были рассчитаны коэффициенты прироста, который выражает соотношение разности между содержанием тяжелых металлов в почве и в материнских почвообразующих породах к общему содержанию в материнских почвообразующих породах – (N-M)/M, % (Спицина, 1992).

При расчете биогеохимического круговорота ТМ древостоем использовали дополнительные индексы разложения фитомассы - коэффициенты, характеризующие интенсивность разложения опада и длительность сохранения подстилки в условиях данного биогеоценоза, равные отношению массы подстилки к массе годичного опада.

Для характеристики линейной зависимости между содержанием тяжелых металлов в органах растений и их содержанием в почве, были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона. Двусторонняя корреляционная связь была выражена нами через показатели регрессии с помощью формул и уравнений, которые дают наглядное представление о форме и тесноте корреляционной

связи между признаками. Полученные экспериментальные данные были обработаны вариационно-статистическими методами, которые описаны в руководстве Н.А. Плохинского с помощью программы Microsoft Excel (Плохинский, 1975).

Глава 4. Биогеохимия тяжелых металлов в почвах, растениях и грибах сосновых боров Семипалатинского Прииртышья

4.1 Валовое содержание и содержание подвижных форм тяжелых металлов в боровых песках сосновых боров Семипалатинского Прииртышья

Боровые пески являются слабогумусированными (содержание гумуса - 0,7%), с низким содержанием органических веществ и отсутствием карбонатов в верхнем гумусовом горизонте, что определяет их низкую активность к накоплению ТМ. Вместе с тем, исторически сложившееся преобладание цветной и перерабатывающей промышленности в Восточном Казахстане, характерная роза ветров и климатические и погодные условия региона способствуют удерживанию ТМ в поверхностном горизонте вследствие снижения интенсивности водной их миграции вглубь почвенного покрова (таблица 1).

Значительная территория сосновых боров находится в зоне влияния населенных пунктов Восточно-Казахстанской области, в том числе и города Семей. Повышенное накопление Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Cr, Ni, V, Be, Mn Sr в равнинных боровых песках отмечено в окрестностях города Семей и в окрестностях сел Долонь и Сосновка Бескарагайского района.

Повышенное содержание Cu, Zn, Pb, Cd, Co, Cr, Ni, Be и V в боровых бугристых песках выявлено в Бородулихинском районе и в окрестностях города Семей. Территория сосновых боров в данных точках отбора испытывает повышенное техногенное воздействие. Бескарагайский район подвержен периодически повторяющимся пожарам, территория села Долонь входит в зону прохождения следа радиоактивных выпадений испытания 1949 г. на Семипалатинском испытательном полигоне, Бородулихинский район находится в зоне влияния крупных промышленных предприятий г. Усть-Каменогорска, Лениногорска, Зыряновска, а также Жезкентского горно-обогатительного комбината.

Город Семей до 1993-1995 гг. был многопрофильным промышленным центром, в котором было зарегистрировано 154 промышленных предприятия, многие десятилетия служившие источниками поступления ряда тяжелых металлов и других элементов в систему «почва-растение» соснового бора.

Таблица 1

Среднее валовое содержание тяжелых металлов в боровых песках сосновых боров по пунктам отбора, мг/кг (глубина 0-30 см)

Элемент	В боровых равнинных песках, n=30			В боровых бугристых песках, n=48			
	В районе с. Долонь, n= 5	В районе с. Сосновка, n= 10	В районе г. Семей, n= 15	В районе с. Бегень (включая горельник), n= 10	В районе с. Сосновка, n= 10	В районе г. Семей, n= 15	Бородулихинский район, n=13
Cu	10,10±0,51 6,41-19,60	9,60±0,48 3,09-20,24	14,50±0,33 9,23-29,60	8,43±0,45) 7,08-11,19	9,23±0,51 8,00-12,19	11,14±0,56 9,24-12,24	12,92±0,60 11,26-12,49
Zn	70,67±6,64 29,67-128,12	61,16±3,06 39,33-116,84	76,55±3,83 45,83-147,44	45,80±2,18 43,20-50,22	43,41±2,53 42,60-48,59	50,40±2,39 45,66-51,85	54,79±2,86 47,68-53,82
Pb	32,58±1,40 22,81-58,81	19,61±1,05 10,53-41,43	29,14±1,60 18,42-61,86	17,03±0,81 14,48 – 18,88	15,15±0,67 12,78 – 18,92	16,44±0,74 13,33 – 19,73	16,42±0,74 14,45 – 18,83
Cd	0,283±0,005 0,002 - 1,02	0,205±0,011 0,002 - 0,86	0,298±0,017 0,032 - 1,82	0,0042±0,0002 0,003 – 0,005	0,0041±0,0003 0,003 – 0,005	0,0052±0,0003 0,003 – 0,005	0,0046±0,0003 0,003 – 0,005
Co	5,34±0,30 3,96-6,75	3,26±0,24 1,82-6,31	7,84±0,42 5,65-8,36	5,11±0,30 4,42-6,00	5,05±0,29 4,51-5,95	5,66±0,37 5,00-6,32	5,50±0,28 4,98-6,11
Cr	15,26±1,04 8,93-20,51	18,03±1,08 10,83-23,62	23,32±1,21 12,63-28,42	20,00±1,01 13,76-23,37	22,02±1,13 15,75-24,64	25,85±1,45 22,76-25,95	18,37±1,41 17,06-24,06
Ni	12,15±0,67 6,70-18,48	13,63±0,78 9,74-20,08	16,55±1,10 11,47-25,48	10,92±0,45 10,38-13,58	12,62±0,81 11,42-16,85	16,53±0,84 12,98-23,84	19,69±0,98 20,08-22,96
V	42,68±2,46 18,21-54,66	32,87±1,82 11,48-38,23	40,31±2,08 20,20-48,82	42,12±2,35 36,36-49,59	45,15±2,40 34,54-50,22	47,10±2,64 36,68-51,50	38,35±2,61 32,38-50,92
Be	1,18±0,11 0,62-1,46	1, 84±0,11 0,84-2,04	2,05±0,09 1,52-2,38	1,43±0,09 1,34-2,10	1,85±0,15 1,61-2,23	2,01±0,18 1,86-2,32	2,67±0,06 1,62-2,40
Mn	333,50±62,94 208,62 – 395,00	333,28±59,63 188,21 – 384,62	326,16±52,87 196,29 – 404,67	441,00±90,15 422,61 – 713,08	461,27±91,63 434,24 – 651,85	448,3±100,05 411,6 – 694,34	470,29±97,49 442,63 – 721,88
Sr	96,34±4,99 42,43-119,37	123,24±8,33 48,88-139,38	100,13±5,55 46,43-128,31	130,17±9,18 124,62-139,62	121,36±6,01 105,51-144,15	109,95±5,64 98,68-126,80	108,32±6,41 83,43-136,18

Примечание - в таблице 1, 3 в числителе - $\bar{x} \pm m_{\bar{x}}$, в знаменателе - min-max, n – количество проб

Содержание ТМ в боровых песках равнинных несколько отличается от такового в бугристых боровых песках и варьирует в широких пределах. Пески равнинные являются более древними, им характерны морфологические и химические признаки осолодения, в отличие от бугристых песков, отличающихся более слабой дифференциацией на генетические горизонты, еще более глубоким залеганием карбонатов и более рыхлым сложением. Возможно, это и определяет различие в их сорбционной способности. Так, в боровых равнинных песках значительно выше накапливаются более тяжелые по атомной массе металлы – Cu, Zn, Pb, Cd, Co, различия могут достигать от 1,05 раза по Co до 58,2 раза по Cd. В бугристых песках отмечены более высокие концентрации металлов с относительно невысокой атомной массой – Cr, Ni, Be, Mn, V, за исключением Sr.

Бугристые боровые пески, имеющие форму барханов, достигают более 6 м в высоту, что отражается на характере распределения ТМ. Содержание приоритетных металлов - загрязнителей Восточного Казахстана (Cu, Zn, Pb, Cd) от вершины к основанию бархана увеличивается (рисунок 1). Это объясняется тем, что, во-первых, осуществляется непрерывный механический перенос частиц песка с возвышенностей в низины, где они скапливаются в большом количестве, что сильно влияет на распределение и содержание тяжелых металлов в песках; во-вторых, в результате выпадения осадков происходит миграционный смыв химических элементов; в-третьих, на содержание тяжелых металлов в песках огромное влияние оказывают растения, численность которых также увеличивается сверху в низ.

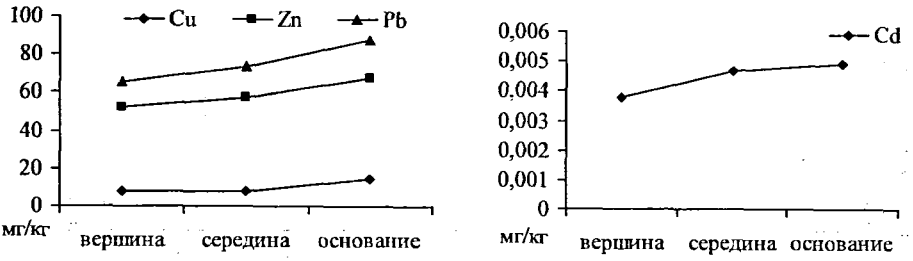


Рисунок 1 - Распределение тяжелых металлов по высоте песчаного бархана

На основе кларка концентраций (Кс) для боровых песков выявлена свинцово-кадмиевая специализация, формула геохимической специализации – $Pb_{1,4}Cd_{1,3}Zn_{0,7}Mn=V_{0,4}Sr=Co=Ni_{0,3}Cr=Cu_{0,2}Be_{0,05}$. Установлено, что кларки концентраций Cd и Pb составляют 1,3 и 1,4 их кларка в земной коре, а среднее валовое содержание Cu, Zn, Co, Cr, Ni, V, Be, Mn, Sr 1,3 до 4,3 раза ниже их кларка в земной коре по А.П. Виноградову. Вместе с тем, содержание свинца близко к уровню концентрации элемента в поверхностном слое почв мира 25,0 мг/кг (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), но выше кларкового значения для почв Восточного Казахстана 15,8

мг/кг (Панин, 1999). Содержание Cu, Cd, Co, Mn в 1,2-1,9 раза ниже их региональных фоновых значений для средней полосы Восточного Казахстана, в пределах которого располагается Семипалатинское Прииртышье; однако концентрации Pb и Zn в 1,4-1,5 раза выше их региональных фоновых значений для средней полосы Восточного Казахстана; концентрации выше ПДК выявлены только для Zn от 2,7 (2,1-3,0 раза), валовое содержание других металлов ниже значений их ПДК.

Главным фактором, определяющим содержание ТМ в почвах, при отсутствии загрязнения являются материнские породы (Виноградов, 1957; Ильин, 1991; Панин, 1999; Ильин, Сысо, 2001; 2004). В почве биотические и абиотические процессы сопряжены и находятся под контролем биогенного фактора. При сопоставлении данных о содержании ТМ в золе исследуемых растений и почвообразующих породах (древнеаллювиальные пески и супеси) средней полосы Восточного Казахстана (Панин, 1999), было установлено, что в золе растений относительно почвообразующих пород содержится в 10,4; 30,7; 6,1 и 1,9 раза больше Cu, Zn, Mn, Co, соответственно. Следовательно, в условиях боровых песков, благодаря растениям, имеются предпосылки для аккумуляции данных металлов в верхних горизонтах почвы. Рассчитанные коэффициенты, характеризующие степень прироста содержания металлов в боровых песках относительно почвообразующих пород, показали, что прирост Cu составил 18,7%, Zn – 54,1%, Co – на 8,4%, а Mn – всего на 0,3%. Относительно Cu, Zn, Co, Mn построены ряды изменения их концентраций от почвообразующей породы, валового содержания в боровых песках и до содержания в растениях (средний показатель по всем исследованным растениям): по Cu: 6,30 – 11,04 – 4,26; по Zn: 40,10 – 61,78 – 41,83; по Mn: 372,5 – 418,05 – 76,84; по Co: 5,0 – 5,42 – 0,53. Данные соотношения концентраций тяжелых металлов могут указывать на то, что содержание Cu, Mn, Co в поверхностном слое боровых песков более всего зависит от их содержания в почвообразующих породах. Несмотря на большую склонность к водной миграции, Zn в боровых песках относительно почвообразующих пород накапливается в большей степени.

Между концентрацией металлов в почвенных растворах и их поглощением корнями растений, как правило, существует прямая линейная зависимость. Следовательно, доступность элементов для растений определяет не запас металлов в почве, а их водорастворимые, или подвижные формы, извлекаемые путем кислотной экстракции или с применением специфических комплексообразователей. Установлено, что содержание исследованных металлов в трех подвижных формах убывает в следующем порядке, мг/кг: в кислоторастворимой форме: Mn > Zn > Sr >Pb > Cu > V > Ni > Co > Cr > Cd > Be; в обменной: Mn > Sr > Zn >Pb > Be > Cr > Co > V = Ni > Cu > Cd; в водорастворимой форме: Mn > Sr > Zn >Pb = V > ≥ Co > Ni > Cd > Cu = Be.

Анализ распределения подвижных форм металлов в верхнем горизонте боровых песков позволяет сделать вывод о том, что отчетливо выделяется биологическое накопление подвижных форм Mn. Таким образом, исследуемые боровые пески можно отнести к биогеохимической про-

винции с резким дефицитом подвижных Pb, Cd, Cu, Co, Cr, Ni, V, Be, Sr, Zn и повышенным содержанием подвижного Mn. Среднее суммарное содержание подвижных форм тяжелых металлов в боровых песках и их соотношение иллюстрируют рисунок 2.

Установлено, содержание подвижных форм металлов в боровых песках не превышает ПДК для подвижных форм в почвах и составляет от 1,0 до 4,4 % его величины. Можно предположить, что между содержанием подвижных форм металлов имеется тесная связь с гранулометрическим составом боровых песков и содержанием в них гумуса.

Рисунок 2 - Соотношение подвижных форм тяжелых металлов в боровых песках сосновых боров Семипалатинского Прииртышья, мг/кг

Валовое количество ТМ, характеризуя общую загрязненность почвы, не отражает степень его доступности для растения. Общий запас подвижной формы ТМ извлекается кислотной вытяжкой. В боровых песках сосновых боров соотношение трех подвижных форм исследуемой группы металлов к их валовому содержанию, а, следовательно, и доступность для растений невелики и составляют для, %: Cd – 9,0; Mn – 2,4; Zn, Co и Be – 1,6; Pb – 1,4; Cu – 1,1; Sr – 0,6; Ni – 0,5; Cr и V – 0,3 (рисунок 3). По отношению кислоторастворимых форм исследуемой группы тяжелых металлов к их валовому содержанию изученные пески относятся к категории фоновых почв, %: Cd – 19,2; Mn – 5,5; Zn – 3,5; Pb – 3,4; Cu – 3,0; Co – 2,4; Ni=Sr – 1,0; V – 0,6; Cr=Be – 0,5.

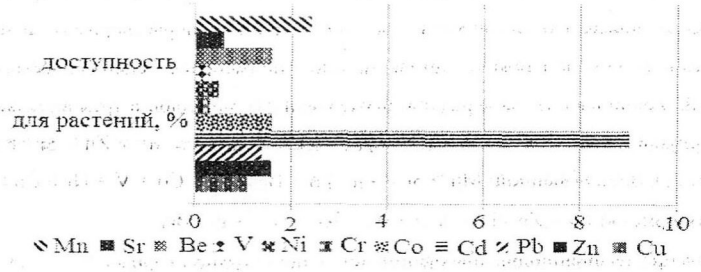


Рисунок 3 - Доступность тяжелых металлов растениям, определяемая по соотношению подвижных форм тяжелых металлов к их валовому содержанию %

Выявлено, что минимальное количество исследованных металлов от валового содержания находится в водорастворимых формах: 0,05% Cu; 0,13 % Zn; 0,22 % Pb; 3,59 % Cd; 0,35 % Co; 0,10 % Cr; 0,07 %Ni; 0,13 %V; 0,28 % Be; 1,89 % Mn; 0,10 % Sr. Между валовым содержанием и подвижными формами металлов в песках обнаружена достоверно высокая прямая корреляционная зависимость (r = 0,98-0,99).

Полученные результаты по содержанию, накоплению и распределению ТМ в поверхностном слое боровых песков сосновых боров, позволяют предположить, что гипергенные процессы - почвообразование, водная миграция, климатические факторы, а также техногенное воздействие человека - вносят коррективы в первоначальный уровень содержания ТМ в материнском субстрате, но прямое влияние на содержание металлов в почве имеют именно факторы почвообразования, а не породы. Почвообразование приводит к определенным нарушениям микроэлементного процесса, характерного для почвообразующей породы. При почвообразовании происходит не только биогенное накопление ТМ, но и изменение их пропорций в благоприятную для растений сторону (Панин, 1999).

4.2 Содержание тяжелых металлов в органах древесных и травянистых растений сосновых боров Семипалатинского Прииртышья

Основной лесообразующей древесной породой семипалатинских сосновых боров является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris L.*). В ходе исследования было рассчитано, что фитомасса древостоя сосны обыкновенной составляет 175,84 т/га; фитомасса надземной части дерева – 246,18 т/га. Количество химических элементов, находящихся в составе массы зрелого фитоценоза, характеризуется емкостью биологического поглощения. При этом роль регуляторного звена принадлежит ассимилирующим органам, в частности, хвое, определяющей рост и развитие других органов растения. От величины годичного роста хвои зависит величина биогенного поглощения металлов. В годы, отличающиеся повышенным ростом хвои за один вегетационный период, величина биогенной аккумуляции металлов хоть и незначительно, но возрастает. Иными словами, под влиянием определенных факторов внешней среды в конкретный момент времени изменяется химический состав не только отдельных органов и тканей растений, но и фитоценоза в целом. Важным показателем интенсивности биогеохимического круговорота является скорость обращения химических элементов, в том числе и тяжелых металлов. Данные о содержании исследованных металлов в органах и тканях сосны обыкновенной сосновых боров Семипалатинского Прииртышья представлены на рисунке 4. По мере роста растений элементы перераспределяются по их органам и тканям с определенной закономерностью, некоторые элементы накапливаются в тесной зависимости друг с другом. Так для V и Be выявлено схожее распределение по органам сосны обыкновенной, которое можно выразить следующим, убывающим рядом: древесина > побеги > хвоя > шишки.

Полученные результаты о содержании ТМ органами и тканями *Pinus sylvestris L.* легли в основу расчета биогеохимического круговорота данных металлов древостоем в условиях сосновых боров Семипалатинского Прииртышья (таблица 2).

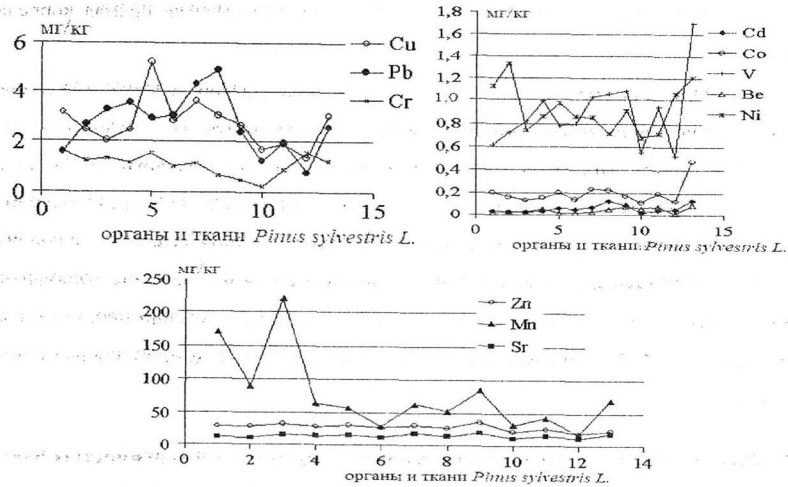


Рисунок 4 - Распределение тяжелых металлов по органам и тканям *Pinus sylvestris L.*

Примечание - на рисунке представлены органы и ткани *Pinus sylvestris L.*: с 1 по 4 – хвоя 1-4 года жизни; с 5 по 9 – побеги от 1-4 до 5-7 лет жизни; 10 – корка с южной стороны, 11 – корка с северной стороны дерева; 12 – шишки; 13 – древесина – совокупность годичных колец.

Таблица 2

Показатели биогеохимического круговорота тяжелых металлов древостоем *Pinus sylvestris L.*

Элемент	Масса тяжелых металлов, вовлеченных в биогеохимический круговорот с учетом индекса разложения фитомассы, т/га	
	фитомассой надземной части дерева	фитомассой древостоя
Cu	0,557	0,127
Zn	1,071	1,200
Pb	0,557	0,127
Cd	0,0026	0,0029
Co	0,0087	0,0090
Cr	0,046	0,052
Ni	0,039	0,043
V	0,037	0,041
Be	0,0002	0,0021
Sr	0,610	0,683
Mn	3,190	3,573
В сумме	6,1185	5,860

По показателю продуктивности древостой сосновых боров соответствует среднему классу бонитета (II-V), который составляет 95% от всех сосновых насаждений. Из этого следует, что почвенно-климатические условия вполне обеспечивают произрастание насаждений сосны обыкновенной средней производительности. Вместе с тем, почвенные, климатические и гидрологические условия не пригодны для произрастания полноценных лиственных насаждений.

Состояние древостоя на исследуемых участках сосновых боров по классификации Крафта соответствует I-III классу жизненности в зависимости от местопроизрастания. Полученные результаты позволяют предположить, что древостой соснового бора характеризуется достаточно высокой емкостью биологического поглощения тяжелых металлов. На элементный состав органов и тканей *Pinus sylvestris L.* существенное влияние оказывает место отбора, т.е. удаленность от промышленных источников эмиссии (рисунок 5), что отражается на интенсивности биогеохимического круговорота металлов фитомассой древостоя сосновых боров, классе бонитета и жизненности деревьев.

В сравнении с хвоей и ветками *Pinus sylvestris L.*, листья и ветки лиственных пород деревьев характеризуются максимальным накоплением ТМ, кроме соединений Cr. Листья *Populus tremula L.* накапливают большее количество Cu, Zn, Sr, Cd, Co по сравнению с листьями *Betula pendula Roth.*, чьи листья более склонны к концентрированию Pb, Ni, V, Be, Mn. Побеги первого года жизни у различных растений по-разному аккумулируют ТМ. Выявлено, что содержания Zn, Pb, Cd, Co, V, Be, Sr выше у *Populus tremula L.*, а Cu, Cr, Ni, Mn у *Pinus sylvestris L.*, наименьшим содержанием всех изученных ТМ отличается *Betula pendula Roth.*

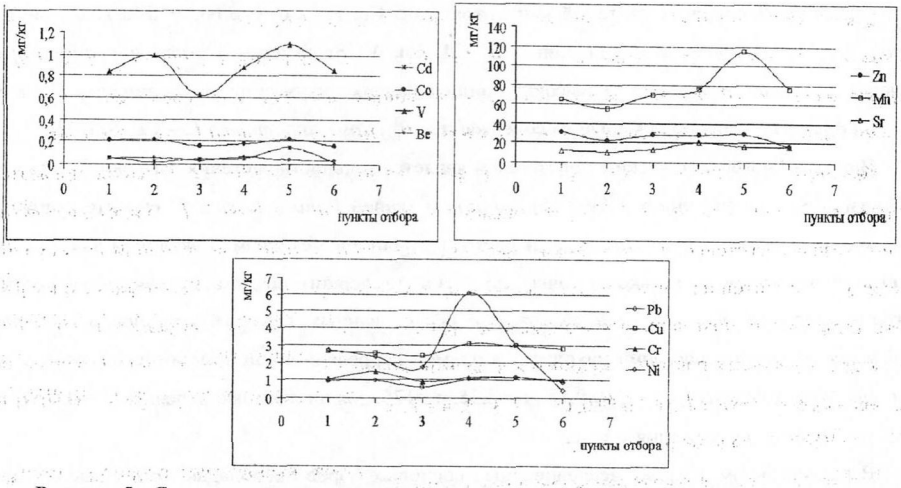


Рисунок 5 - Содержание тяжелых металлов в органах и тканях *Pinus sylvestris L.* по пунктам отбора: сосновый бор в окрестностях с. Бегень; с. Бегень (горельник 2007 г.); с. Долонь; с. Сосновка; г. Семей; Бородулихинский район

Определенным депо по отношению к металлам служит и корка деревьев, характер накопления тяжелых металлов в ней может зависеть от параметров микроклимата. Так, зольность корки с южной стороны у *Pinus sylvestris L.* и у *Populus tremula L.*, примерно в 1,2 раза больше, чем с северной стороны, а содержание металлов с южной стороны, наоборот, меньше, чем с северной от 1,1 до 3,4 раза. Однако аккумулятивная способность корки хвойных и лиственных деревьев имеет ряд существенных отличий. Cu, Zn, Pb, Cd, V, Sr (63,6% изученных нами металлов) накапливаются в корке *Populus tremula L.* в больших концентрациях, чем в корке *Pinus sylvestris L.*, а Cr, Be, Mn сильнее накапливаются в корке *Pinus sylvestris L.* В корке обоих деревьев обнаружены равные количества Ni.

Сравнительный анализ среднего содержания ТМ в исследованных органах деревьев показал, что наибольшее количество металлов в повышенных концентрациях (Pb, Cd, Co, Zn, V, Sr) накапливается в *Populus tremula L.* Органы *Betula pendula Roth.* являются концентраторами соединений Cu, Ni, Mn, Be. Для *Pinus sylvestris L.* выявлено повышенное содержание соединений Cr. По сравнительной интенсивности поглощения тяжелых металлов древесные породы располагаются в ряду: *Populus tremula L.* > *Pinus sylvestris L.* > *Betula pendula Roth.* Это подтверждается и выведенными формулами геохимической специализации: для *Pinus sylvestris L.*– $Cd_{0,47}Zn_{0,31}Pb_{0,17}Ni_{0,16}Mn_{0,08}$ $Cu_{0,06}Sr_{0,04}V{=}Co{=}Cr{=}Be_{0,01}$; для *Populus tremula L.* - $Cd_{2,33}Zn_{1,0}Pb_{0,24}Sr_{0,23}Cu_{0,1}Mn_{0,07}Co_{0,05}$ $Ni_{0,02}V{=}Be_{0,01}Cr_{0,006}$; для *Betula pendula Roth.* – $Zn_{0,89}Cd_{0,58}Pb_{0,2}Cu{=}Mn_{0,11}Ni_{0,05}Sr_{0,003}Be{=}Co_{0,02}V{=}Cr_{0,01}$, следует, что лиственные породы деревьев, в частности *Populus tremula L.*, более склонна к накоплению Cd и Zn.

Среди кустарниковых растений концентратором Cu, Zn, Cd, Co, Ni, V, Mn является *Salix viminalis L.* Меньше всех к накоплению Zn, Cd, Co, V, Sr склонна *Caragana pumila Pojark. Crataegus laevigata (Poir.) DC.* в высоких концентрациях аккумулирует соединения Cr и Be; *Viburnum opulus L.* отличается меньшим содержанием Pb; *Rosa cinnamomea L.* – Cu, Ni и Mn.

Важным биогеохимическим показателем является зольность растения. Высокие показатели зольности (2,32 при значениях 1,59-2,95) органов и тканей *Pinus sylvestris L.* свидетельствуют о высокой газопоглотительной способности растения, наличии механизмов активной аккумуляции химических элементов не только из почвы, но и из атмосферного воздуха. Рассчитанные коэффициенты корреляции показали, что содержание исследованных тяжелых металлов в воздушно-сухой массе древесных растений находится в прямой корреляционной зависимости (среднее значение для *Pinus sylvestris L.*: $r = 0,9 \pm 0,15$, $t = 3,35$, $n = 175$, для лиственных деревьев: $r = 0,69 \pm 0,16$, $t = 9,3$, $n = 30$) от их содержания в золе.

В растительном покрове исследованных сосновых боров преобладают осоковые, степные дерновинные злаки и разнотравье. В ходе исследования выявлена определенная зависимость содержания ТМ в травянистых растениях от их удаленности от источника загрязнения (таблица 3).

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в травянистых растениях по пунктам отбора, мг/кг сухого вещества

Пункты отбора	Cu	Zn	Pb	Cd	Co	Cr	Ni	V	Be	Sr	Mn
1	5,54±0,4	50,03±3,2	4,00±0,2	0,121±0,007	0,820±0,05	1,94±0,14	3,00±0,2	4,98±0,3	0,175±0,01	57,98±2,9	131,6±7,9
	3,21-14,02	12,90-156,56	1,26-8,21	0,003-0,983	0,151-2,427	0,24-7,52	1,11-7,45	0,41-13,35	0,039-0,495	7,6-145,8	12,9-786,7
2	4,17±0,3	32,05±1,9	3,21±0,2	0,084±0,005	0,607±0,04	1,92±0,14	2,28±0,2	2,60±0,1	0,105±0,006	31,39±1,2	154,1±9,6
	2,48-9,17	10,63-74,87	1,61-6,57	0,015-0,197	0,093-1,442	0,48-3,61	2,16-3,97	0,56-5,23	0,032-0,125	9,1-32,5	24,2-574,5
3	5,34±0,4	31,01±2,1	2,17±0,1	0,162±0,010	0,314±0,02	1,62±0,12	1,84±0,1	2,36±0,1	0,111±0,007	49,05±2,4	130,1±8,2
	0,72-24,24	0,65-190,92	0,27-13,82	сл.-0,663	0,014-2,530	0,21-31,98	0,02-10,98	0,13-9,04	0,006-1,458	4,0-152,7	20,0-610,9
4	4,59±0,4	34,03±1,9	4,12±0,3	0,187±0,011	0,406±0,03	0,91±0,09	2,00±0,1	1,98±0,1	0,068±0,004	59,86±2,9	60,2±4,2
	0,76-31,09	5,23-241,47	0,88-24,07	сл.-2,173	0,040-1,544	0,10-6,04	0,07-12,78	0,25-6,73	0,015-0,302	11,0-147,3	10,5-312,4
5	7,17±0,5	34,12±2,2	3,37±0,2	0,152±0,009	0,800±0,05	1,78±0,13	3,30±0,2	3,98±0,2	0,195±0,01	54,83±2,5	112,1±7,1
	4,62-10,80	12,24-59,51	0,31-16,18	сл.-1,148	0,174-2,397	0,34-7,01	0,86-7,19	0,52-10,70	0,015-0,694	19,6-86,5	32,7-337,5
Среднее,	5,41±0,4	36,25±2,3	3,37±0,2	0,141±0,008	0,590±0,04	1,63±0,12	2,48±0,2	3,18±0,2	0,131±0,007	50,62±2,4	117,62±7,4
n = 417.	0,72-31,09	0,65-190,92	0,27-24,07	сл.-2,410	0,010-3,210	0,09-31,98	0,06-12,78	0,12-13,87	0,006-0,526	4,00-152,74	2,36-786,69

Примечание – пункты отбора: 1 - в районе с. Бегень, n = 90; 2 - в районе с. Бегень, n = 45 (горельник 2007 г.); 3 - в районе с. Сосновка, n = 108; 4 - в районе г. Семей, n = 120; 5 - в Бородулихинском районе, n = 54.

Максимально высокие концентрации Cd, Sr, Pb были обнаружены в растениях, произрастающих в сосновом бору в окрестностях г. Семей, предприятия и автотранспорт которого могут служить источником поступления аэрозолей ТМ в атмосферный воздух. В сосновом бору в окрестностях с. Бегень в травянистых растениях наблюдаются повышенные концентрации Zn, Co, V, а в растениях на месте пожара увеличено содержание Cr и Mn. Травянистый покров соснового бора в Бородулихинском районе в больших концентрациях накапливает соединения Cu, Ni, Be. Повышенные концентрации Be в фитоценозе соснового бора могут являться следствием наличия на территории Восточно-Казахстанской области аномальных его концентраций естественного и искусственного происхождения. В 12.09.1990 г. на бериллиевом производстве объединения «Ульбинский металлургический завод» в Усть-Каменогорске произошел взрыв водорода, приведший к выбросу Be в атмосферу около 63 кг порошкового бериллия. Превышение ПДК достигало 60-890 раз, при значениях ПДК для воздуха в пересчёте на бериллий 0,001 мг/м³ (Ульбинский ..., 2012). Следует учитывать и тот факт, что Восточный Казахстан, в силу исторически сложившегося экономического развития, связанного с преобладанием цветной металлургии и горнодобывающей промышленности, является одним из наиболее неблагополучных регионов в Казахстане. Растения, отражая видовые особенности содержания металлов, несут, вместе с тем, локальную окраску состава среды их обитания. Выявлено, что по всем пунктам отбора, содержание Cu (в 0,8-1,8), Zn (в 1,1-1,9), Co (в 1,2-3,1) и Mn (в 1,3-2,9) превышает их региональные кларковые значения для дикорастущих растений Семипалатинского Прииртышья. Относительно фоновых значений данных элементов для растений, превышений средних концентраций по Cu, Pb, Cd, Co, Ni, Cr, V, Be, Mn не обнаружено. По максимальным значениям концентрации выше фона обнаружены для Cu, Pb, Cr, Be. Содержание Zn в травянистых растениях по всем пунктам отбора выше фоновых его значений в 0,4-1,6 раза, максимальные концентрации Zn зафиксированы в растениях, произрастающих в сосновом бору в окрестностях г. Семей. Вместе с тем, в среднем содержание Cu, Zn, Co, Mn в 1,5; 1,3; 1,6 и 1,9 раза, соответственно, ниже концентраций их в растительности континентов по В.В. Добровольскому, кроме Pb, содержание которого в 3,0 раза выше данного показателя.

Уровни содержания ТМ в травянистых растениях, относящихся к различным семействам, значительно варьирует. Практически все изученные растения, кроме маревых (*Chenopodiaceae Less.*), гвоздичных (*Caryophyllaceae Juzz.*), капустных (*Brassicaceae Burnett*), зонтичных (*Umbelliferae Moris.*), заразиховых (*Orobanchaceae Lindl.*) накапливают Be выше его фоновых концентраций в растениях (по Панину, 2000).

Астровые (*Asteraceae Bercht. & J. Presl*), осоковые (*Cyperaceae J. St. Hill.*), лилейные (*Liliaceae Hall.*), гвоздичные (*Caryophyllaceae Juzz.*), лютиковые (*Ranunculaceae Juzz.*), мареновые (*Rubiaceae Juzz.*), норичниковые (*Scrophulariaceae Lindl.*) накапливают Mn, Zn, Cu, Co в концентрациях, значительно превышающих их региональные кларки для дикорастущей растительности

средней полосы Восточного Казахстана (по Панину, 1999). Превышение региональных значений по Co, Zn, Mn зафиксировано в растениях из семейств мятликовые (*Poaceae Burnett*), розоцветные (*Rosaceae Juzz.*), ворсянковые (*Dipsacaceae Lindl.*) и подорожниковые (*Plantaginaceae Lindl.*); в растениях из семейств бобовые (*Leguminosae Juzz.*) и хвощевые (*Equisetaceae Rich.*) обнаружены концентрации Co, Cu, Mn, превышающие их региональные кларки. Выше кларковых значений накапливают Mn, Co, растения из семейств капустные (*Brassicaceae Burnett*) и тутовые (*Moraceae Lindl.*); Mn и Zn – заразиховые (*Orobanchaceae Lindl.*); Co – зонтичные (*Umbelliferae Moris.*).

Растения из семейств осоковые (*Cyperaceae J. St. Hill.*), мятликовые (*Poaceae Burnett*), розоцветные (*Rosaceae Juzz.*) являются накопителями Mn, Zn в концентрациях, превышающих фоновые значения. Вышефоновые концентрации Cd зафиксированы в растениях семейств розоцветные (*Rosaceae Juzz.*), Zn – у подорожниковых (*Plantaginaceae Lindl.*).

Содержанием ТМ в концентрациях, не превышающих фоновые значения, отличаются растения семейства заразиховые (*Orobanchaceae Lindl.*). Вероятно, это связано с тем, что заразиховые (*Orobanchaceae Lindl.*) являются паразитами, и их химический состав зависит от химического состава организма – хозяина.

Некоторые семейства травянистых растений содержат аномальные для растений концентрации металлов (Панин, 2000). Аномальные для растений концентрации Cu, по верхним границам ее содержания, выявлены у астровых (*Asteraceae Bercht. & J. Presl*); Zn – у мятликовых (*Poaceae Burnett*) и подорожниковых (*Plantaginaceae Lindl.*); Cr – у мятликовых (*Poaceae Burnett*) и лилейных (*Liliaceae Hall.*); Be – астровых (*Asteraceae Bercht. & J. Presl*), у мятликовых (*Poaceae Burnett*), лилейных (*Liliaceae Hall.*), розоцветных (*Rosaceae Juzz.*) и бобовых (*Leguminosae Juzz.*); Cd – у мятликовых (*Poaceae Burnett*). В растениях из семейства мятликовые (*Poaceae Burnett*) зафиксированы аномально высокие концентрации четырех металлов – Zn, Be, Cr и Cd. Содержание одновременно двух металлов с аномальными для растений концентрациями обнаружено у астровых (*Asteraceae Bercht. & J. Presl*) (Cu, Be) и лилейных (*Liliaceae Hall.*) (Cr, Be).

Адаптация к высоким концентрациям элементов приводит к появлению видов – концентраторов (и сверхконцентраторов) отдельных элементов. Проведенные исследования показали, что к сверхконцентраторам Cu, Zn, Cd, Cr, Be можно отнести растения семейств мятликовые (*Poaceae Burnett*), лилейные (*Liliaceae Hall.*), розоцветные (*Rosaceae Juzz.*) и бобовые (*Leguminosae Juzz.*).

Исследованные семейства растений по-разному распределяют металлы в надземной и подземной части растения. Травянистые растения из семейства осоковые (*Cyperaceae J. St. Hill.*), ворсянковые (*Dipsacaceae Lindl.*), тутовые (*Moraceae Lindl.*), подорожниковые (*Plantaginaceae Lindl.*) накапливают ТМ в подземной части, а растения из семейства капустные (*Brassicaceae Burnett*) и зонтичные (*Umbelliferae Moris.*) – в надземной части растений, вероятнее всего, за счет нарушения функций корневого барьера, о чем свидетельствует коэффициенты перераспределения.

Для отражения корреляционной зависимости между содержанием ТМ в надземных и подземных частях растений выведены регрессионные уравнения прямолинейной функции и рассчитаны коэффициенты корреляции. Данные корреляционного анализа показывают: достоверная высокая прямая корреляционная зависимость между содержанием ТМ в надземных и подземных частях растений существует только для Cd ($r = 0,82 \pm 0,08$, $t = 10,8$) и Cu ($r = 0,59 \pm 0,02$, $t = 2,95$). Для остальных ТМ четкой корреляционной зависимости не обнаружено.

Выявлено, что распределение Co, Ni, V, Mn происходит в порядке убывания – плоды > листья > цветки > стебли; Be и Sr - плоды > цветки > листья > стебли, для остальных металлов общей закономерности не выявлено.

В листьях таволги зверобоелистной обнаружено содержание 11, а в листьях цмина песчаного 10 исследованных металлов в концентрациях выше их средних значений. Минимальные концентрации всех элементов отмечены в листьях конопли сорной и полыни белеющей. Полученные данные о металлонакопительных способностях травянистых растений сосновых боров Семипалатинского Прииртышья целесообразно использовать при разработке мероприятий по фиторемедиации территорий с возможным загрязнением соединениями ТМ. Особенно перспективно в этом направлении использовании таволги зверобоелистной, цмина песчаного и некоторых представителей семейства розоцветные. Эти растения, обладая хорошими металлопоглотительными возможностями, способны создавать эстетически приятный вид городским ландшафтам.

Особый интерес в целях фиторемедиации представляют возможности аккумулировать соединения ТМ подземными частями растений. Выявлено, что ведущую роль в активной аккумуляции металлов в подземной части растений играют осоковые и злаковые, особенно дерновинные, сложноцветные, тутовые и бобовые, развивающие крупные корневые системы.

Как показали исследования, корневая система большинства видов растений обладает высокой аккумуляционной способностью. Растения осока стоповидная, скабиоза бледно-желтая, конопля сорная и подорожник прижатый можно отнести к растениям–исключателям (Серегин, Кожевникова, 2008), поскольку у этих растений поглощаемые металлы задерживались в корневой системе и практически не поступали в побеги. В побегах растений-исключателей поддерживается низкая концентрация металлов, несмотря на высокую концентрацию в окружающей среде, в этом случае барьерную функцию выполняет корень. Для Cd и Pb эта функция определяется барьерной ролью эндодермы, в то время как для металлов, проходящих через эндодермальный барьер (Ni), могут функционировать иные морфофизиологические барьеры на уровне корня, например, накопление в местах перфораций (по Серегину, 2009). Все перечисленные барьеры, однако, не универсальны для всех металлов. В отличие от исключателей, у гипераккумуляторов функциональные барьеры на уровне корня и побега отсутствуют.

Одни и те же металлы могут оказывать различное физиологическое влияние не только в разных органах, но и на разных фазах развития растения, о чем свидетельствуют рассчитанные коэффициенты корреляции между различным парами металлов в отдельных подземных и надземных органах растений. Так установлено, что больше всего положительных корреляционных связей происходит на стадии формирования и существования плода, значения коэффициента корреляции колеблется от 0,46 до 0,93 для разных металлов. Больше всего положительных корреляционных связей установлено между содержанием в плодах растений Cu и Co с другими металлами. Так, с достаточно высокой достоверностью установлены зависимости между Cu и Zn (r = 0,46±0,25), Cu и Co (r = 0,72±0,16), Cu и V (r = 0,78±0,12), Cu и Cr (r = 0,69±0,16). Для соединений Co положительные корреляционные связи выявлены также с соединениями Cr (r = 0,58±0,18), Mn (r = 0,80±0,09) и V (r = 0,86±0,08). Положительные корреляционные связи установлены еще для ряда пар металлов, таких как Cd-V, Cd-Mn, Cr-V, Cr-Mn, Zn-Be, V-Mn, Pb-Sr, со значениями коэффициента корреляции 0,57-0,93. Вместе с тем, в плодах растений выявлены и отрицательно коррелирующие пары металлов, например, Cu-Pb (r = -0,76±0,13), Pb-Be (r=-0,62±0,19), Cr-Sr (r=-0,51±0,21) и Be-Sr (r = -0,62±0,19).

Обнаружено, что две пары металлов Cd-Cr (r = 0,63-0,69) и V-Mn (r = 0,46-0,57) положительно коррелируют между собой и в листьях, и в стеблях, и в цветках растений.

В стеблях растений положительные корреляционные связи выявлены между парами Zn-Cd, Co-V, Cd-Mn, Cr-Mn со значениями коэффициента корреляции 0,51-0,78, отрицательные корреляционные зависимости характерны для пары Cr-Sr (r = -0,46±0,24).

В листьях травянистых растений выявлены только положительные корреляционные зависимости между парами Co-V, Co-Be, Co-Sr, Cd-Mn, значение коэффициента корреляции колеблется от 0,51 до 0,74.

В цветках растений выявленные корреляционные связи между парами металлов Co-V, Co-Be, Cd-Mn являются положительными (r = 0,49-0,78).

Выявленные положительные корреляционные связи между парами Co-V и Cd-Mn прослеживаются и в стеблях, и в листьях, и в цветках, и в плодах травянистых растений.

Положительно коррелирующая между собой пара Co-Be зафиксирована как в листьях, так и в цветках растений.

В корнях травянистых растений выявлены только положительные зависимости. Больше всего коррелирующих пар обнаружено для Cr. Соединения Cr коррелируют со Pb, Ni, V, Be, Mn, Co, при размахе варьирования коэффициента корреляции от 0,46 до 0,86. Соединения Mn положительно коррелируют с соединениями Zn, Cd, Ni (r = 0,51-0,65); для соединений Ni отмечены положительные связи с соединениями V (r = 0,60±0,20); Co вступает в положительные взаимодейст-

вия с соединениями V и Be (r = 0,80-0,83); вместе с тем для Be выявлены положительные корреляционные связи с соединениями V, Sr и Zn (r = 0,52-0,60).

Исследование содержания металлов в подземных видоизмененных побегах (корневищах и луковицах) травянистых растений выявило много общих черт в распределении и взаимовлиянии металлов с корнями растений. Обнаружены аналогичные пары металлов, положительно коррелирующие между собой как в корнях растений, так и в подземных побегах. Это пары Cr с V, Mn, Be, Co; Be с Zn, Sr, V; Mn с Zn и Ni; V с Co и Ni (r = 0,47-0,70). Вместе с тем, в подземных побегах обнаружены положительные связи Mn со Pb, Co, V и Be.

Обнаруженные в подземных побегах растений положительные корреляционные связи между Zn и Cd были также зафиксированы и в стеблях растений.

Общими для надземных и подземных органов растений оказались и положительно коррелирующие пары металлов Cr-Mn, Cr-V, Cr-Co, Co-V, Mn-Cd и Co-Be.

Выявлено, что однодольные и двудольные растения характеризуются кадмиевой геохимической специализацией химического состава. Формула геохимической специализации однодольных травянистых растений имеет следующий вид - $Cd_{1,3}$ $Zn_{0,5}$ $Pb_{0,2}$ $Ni_{0,2}$ $Mn_{0,2}$ $Cu_{0,1}$ $Cr_{0,04}$ $Be_{0,03}$ $V_{0,01}Co_{0,01}Sr_{0,004}$, а для двудольных - $Cd_{1,0}$ $Sr_{0,06}$ $Zn_{0,4}$ $Pb_{0,2}$ $Cu_{0,1}$ $Ni_{0,1}$ $Mn_{0,1}$ $Cr_{0,02}$ $Be_{0,02}$ $V_{0,01}$ $Co_{0,01}$, из которых видно, что двудольные растения накапливают в фитомассе Sr на порядок выше, чем однодольные. Высокая мобильность Sr может определяться невысокой прочностью связывания его с материалом клеточных оболочек, и в тоже время значительная часть металла может находиться на поверхности клеточных оболочек или в периплазматическом пространстве. В совокупности это может определять высокую мобильность Sr, в результате чего модификация клеточных оболочек паренхимы стелы не ограничивает его передвижение в более глубокие ткани корня, в том числе в клетки сердцевины (Серегин, 2009).

Рассчитанные коэффициенты накопления доказывают, что травянистые растения сосновых боров даже в условиях незагрязненных почв накапливают ТМ в высоких концентрациях, и при этом валовое содержание ТМ в почве не является главным источником данных элементов для растений. Основное поглощение металлов идет за счет их подвижных, более доступных для растений форм, а также за счет их поступления из атмосферы. Относительно соединений Cd, Pb, Ni у растений наблюдается нарушение функции корневого барьера, о чем свидетельствует коэффициенты перераспределения ($К_П$ = 1,4; 1,0; 1,0, соответственно).

Согласно рядам биологического поглощения (по Перельману, 1989), для травянистых растений сосновых боров элементом энергичного накопления является Cd (11,1); элементами сильного накопления (КБП от 1,1 до 7,6) – Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Sr, Mn, а слабого накопления и среднего захвата (КБП 0,7-0,8) – Cr, V, Be. Относительно ПБЭ существенную роль в общем круговороте веществ в лесной экосистеме играют Cd (1,1) > Sr (0,6) > Zn (0,4).

В ходе исследования закономерностей накопления ТМ растениями сосновых боров выявлено, что существует определенная зависимость в накоплении ТМ растениями от их жизненной формы. Исследования показали, что металлоакумуляционная способность растений в зависимости от принадлежности к различным жизненным формам неодинакова. В фитомассе деревьев выше концентрации Zn и Cd, чем в кустарниках и травах. В фитомассе травянистых растений концентрации Cu, Pb, Cr, Ni, Be, Mn, Co, Sr выше, чем в кустарниках и деревьях. В порядке увеличения концентраций металлов изученные формы растений образуют следующие ряды: по содержанию Cu, Pb, Cr, Ni, Be, Mn – кустарники – деревья – травы; по содержанию Zn - травы – кустарники – деревья; по содержанию Cd - кустарники – травы – деревья; по содержанию Co, Sr – деревья – кустарники – травы. Вероятнее всего, отличия связаны с уровнем организации анатомо-морфологической структуры и физиолого-биохимических функций растений, степенью адаптации их к условиям среды, и также обусловлены, как было сказано выше, характером корневых систем, глубиной проникновения корней в почву и различным объемом почвы, из которого растение усваивает тяжелые металлы.

Таким образом, исследование химического состава растений показало, что для фоновых боровых песков сосновых боров большее значение имеет ландшафтно-геохимические условия миграции металлов и связанные с ними биогеохимическая специализация растений по семействам и классам. Количество металлов и формы их соединений в растениях сосновых боров определяются физико-химическими свойствами элементов, их физиологической ролью в метаболических процессах, биологическими особенностями растений, а также содержанием ТМ в почвообразующих породах, в боровых песках и атмосфере.

4.3 Аккумуляция тяжелых металлов грибами сосновых боров Семипалатинского Прииртышья

Изучение содержания ТМ в плодовых телах базидиомицетов, развивающихся в условиях природных экосистем, не испытывающих существенного техногенного воздействия, показало, что элементный состав базидиом грибов отличается сильной вариабельностью (рисунок 6).

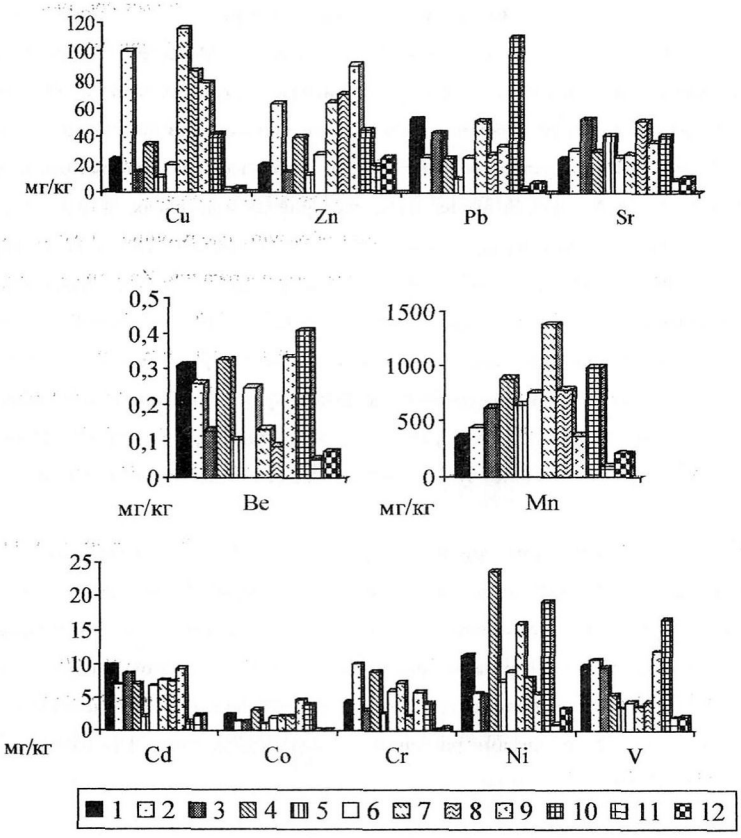


Рисунок 6 - Распределение тяжелых металлов в грибах сосновых боров Семипалатинского Прииртышья

Примечание - виды грибов: 1. *Russula lilacea Quel.* 2. *Russula densifolia Gill.* 3. *Russula fragilis Fr.* 4. *Russula rubra Fr.* 5. *Russula foetens Fr.* 6. *Cantharellus aurantiacus (Wulfen) Fr.* 7. *Agaricus campestris (Schaefer.) Fr.* 8. *Lactarius piperatus (Fr.) S.F. Gray.* 9. *Suillus luteus (Fr.) S. F. Gray* 10. *Amanita pantherina (Fr.) Secr.* 11. *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing.* 12. *Fomes fomentarius (L.:Fr.) Gill.*

Некоторые базидиомицеты, развиваясь даже в условиях незагрязненных экосистем, накапливают в своих плодовых телах элементы в концентрациях, превышающих установленные лимиты (Костычев, 2009). Мицелий микоризообразующих видов располагается в более глубоких горизонтах почвы, и грибы способны воспринимать ТМ из почвы, где они содержатся лишь в виде следов, впитывать их и хранить в плодовом теле. Поскольку плодовые тела *Russula lilacea Quel.*, *Russula*

densifolia Gill., *Russula fragilis Fr.*, *Russula rubra Fr.*, *Russula foetens Fr.*, *Cantharellus aurantiacus (Wulfen) Fr.*, *Agaricus campestris (Schaefer.) Fr.*, *Lactarius piperatus (Fr.) S.F. Gray.*, *Suillus luteus (Fr.) S. F. Gray*, *Amanita pantherina (Fr.) Secr.*, *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing.*, *Fomes fomentarius (L.:Fr.) Gill.* развивались в схожих эдафических условиях, можно отметить, что главным фактором, определяющим величину и избирательный характер накопления ТМ, является не экологическая обстановка, а комплекс биологических особенностей представителей разных видов (Второва и др., 2003; Голубкина, 2002; Костычев, 2009; Цветнова, Щеглов, 2002; Kalač, 2004). С другой стороны, отмечается и тот факт, что техногенное воздействие на экосистемы вызывает достоверное увеличение содержания ТМ в плодовых телах базидиальных макромицетов (Поддубный, Христофорова, 1999; Чураков и др., 2004.).

Особенностью грибов является их способность аккумулировать химические элементы именно из субстрата, тогда как другие используемые в качестве биоиндикаторов объекты концентрируют токсиканты из атмосферы (мхи, лишайники) или одновременно из нескольких сред (сосудистые растения) (Костычев, 2009).

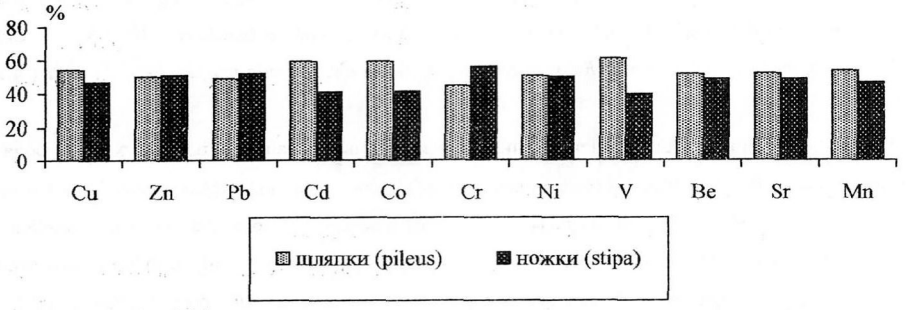
Большинство изученных грибов отличаются повышенным накоплением отдельных металлов или групп металлов. К таким грибам, прежде всего, можно отнести *Agaricus campestris (Schaefer.) Fr.* – Cu, Mn; *Suillus luteus (Fr.) S. F. Gray* – Zn, Co; *Amanita pantherina (Fr.) Secr.* – Cd, Pb, V, Be; *Russula lilacea Quel.* – Cd; *Russula densifolia Gill.* – Cr; *Russula fragilis Fr.* – Sr и *Russula rubra Fr.* – Ni.

Наименьшей способностью к накоплению исследованных металлов в плодовых телах обладают ксилотрофные базидиомицеты (рисунок 6), что объясняется биологическими особенностями этих грибов. Ксилотрофные базидиомицеты являются неотъемлемым компонентом гетеротрофного блока лесных экосистем. Благодаря мощному ферментативному комплексу, способному разлагать лигноцеллюлозы, дереворазрушающие базидиомицеты играют ведущую роль в процессе деструкции древесины, который является одним из ключевых этапов в круговороте веществ и трансформации энергии в лесных экосистемах (Бердиева, 2005). Ксилотрофные базидиомицеты имеют свою субстратную специализацию, которая проявляется в их преимущественной приуроченности к древесным остаткам определенных видов деревьев (Мухин, 1993). Кроме того, питание и метаболизм ксилотрофных грибов тесно связаны со свойствами субстрата – стволов, пней, корней, в древесине которых развивается мицелий (Второва и др., 2003), что и объясняет их низкую аккумуляционную способность относительно ТМ.

Во всех изученных грибах (кроме трутовиков) содержание Cu и Zn превышает их ПДК для грибов по Cu (ПДК 10,0 мг/кг) от 1,1 до 11,6 раз и по Zn (ПДК 20,0 мг/кг) - от 1,4 до 4,5 раз. А содержание Pb (ПДК 0,5 мг/кг) и Cd (ПДК 0,1 мг/кг) во всех изученных грибах, включая

трутовики, превышает их ПДК для грибов от 5,4 до 219,4 раза по Pb и от 13,4 до 99,4 раз - по Cd. Содержание V в грибах санитарными нормами не предусмотрено (Позняковский, 1996, 2002).

Более высокое содержание ТМ в грибах связано с наличием в почвах подвижных форм элементов. Грибы плохо или совсем не усваивают труднорастворимые формы. Известно, что обменные процессы наиболее интенсивны в шляпках, поэтому и концентрации макро- и микроэлементов там выше, чем в ножках (Герштанский, 2006; Цветнова, Щеглов, 2002). Однако данная закономерность в распределении по органам грибов проявляется не для всех изученных металлов. Установлено, что все исследованные грибы максимально накапливают в шляпках соединения Cu, Cd, V, Ni, Co, Sr, Be. Максимальное накопление соединений Zn, Pb, Cr происходит в ножках данных грибов (рисунок 7). Причем, металлонакопительная способность разных органов грибов может значительно отличаться. Оценивая аккумуляционную способность грибов, по отношению к изученным тяжелым металлам, в зависимости от принадлежности к определенному семейству, исследуемые высшие грибы можно распределить в следующем убывающем порядке: шампиньоны (*Psalliota*) > мухоморы (*Amanita*) > млечники (*Lactarius*) > лисички (*Cantharellus*) > сыроежки (*Russula*) > масленики (*Boletus*).



Ри

сунок 7 - Соотношение содержания тяжелых металлов в шляпках и ножках к общему их содержанию в плодовом теле изученных видов грибов (в их совокупности), %

Для каждого отдельного вида характерна определенная геохимическая структура и формула геохимической специализации (относительно кларка в литосфере) его химического состава. Для большинства изученных видов грибов (66,7%) характерна кадмиево-свинцовая и кадмиево-свинцово-медная специализация химического состава, для *Boletus luteus Fr.* - кадмиево-свинцово-медно-цинковая, а для *Amanita pantherina Fr.* – кадмиево-свинцово-марганцевая, для *Russula foetens Fr.* и *Cantharellus aurantiacus Fr.* - кадмиевая специализация химического состава.

Интенсивность поглощения элементов прямо пропорциональна ПБЭ, у трутовиков ПБЭ изменялся от 0,006 до 19,0, у остальных грибов от 0,2 до 73,8. Максимальные значения отмечены

для *Amanita pantherina Fr.* По среднему значению ПБЭ все исследованные виды грибов можно отнести к группе интенсивного поглощения ТМ при широком размахе данного показателя. По показателю биотичности Cu, Zn, Pb, Cd играют наиболее существенную роль в биологическом круговороте веществ в микоценозе, а Co, Cr, Ni, V, Be, Sr, Mn – менее значительную.

Мощным источником поступления ТМ в грибы является почвенный покров, на котором они произрастают. Корреляционный анализ показал, что для всех изученных грибов имеет место достоверная высокая прямая корреляционная зависимость между содержанием в грибах Cu и ее валовым содержанием в почве, для подвижных ее форм выявленные корреляционные связи имеют низкую достоверность. Для соединений Zn четкой корреляционной зависимости не обнаружено. Для всех грибов имеет место прямая корреляционная зависимость содержания Zn в грибах и его валовым содержанием и кислоторастворимой формой в почве, для остальных подвижных форм выявленные корреляционные связи имеют низкую достоверность. Между содержанием в грибах и в почве Pb, Cr, Ni, V, Be общей корреляционной закономерности не обнаружено, выявленные корреляционные связи имеют низкую достоверность. В отношении Cd выявленная прямая корреляционная зависимость имеют низкую достоверность. Для всех грибов обнаружена обратная корреляционная зависимость содержания Co в грибах и его подвижными формами в почве, для кислоторастворимой формы эти связи имеют прямую направленность. Достоверная высокая прямая корреляционная связь обнаружена между содержанием в грибах Sr и его валовой формой в почве, в остальных случаях, выявленные корреляционные связи имеют низкую достоверность.

Обнаружена общая корреляционная закономерность в содержании Mn в изученных грибах и его валовым содержанием и подвижными формами (кроме кислоторастворимой формы) в почве. В случае с кислоторастворимой формой Mn выявленная слабая обратная корреляционная связь имеет очень низкую достоверность.

Рассчитанные коэффициенты накопления металлов грибами относительно валового их содержания в почве, показали, что в микобиоте лесного биогеоценоза концентраторами элементов по убыванию являются: *Amanita pantherina (Fr.) Secr.* (6,6) > *Suillus luteus (Fr.) S. F. Gray* (6,3) > *Russula lilacea Quel.* (6,1) > *Agaricus campestris (Schaefer.) Fr.* (6,0) > *Russula fragilis Fr.* (5,3) = *Lactarius piperatus (Fr.) S.F. Gray.* (5,3) > *Russula rubra Fr.* (4,9) > *Cantharellus aurantiacus (Wulfen) Fr.* (4,4) > *Russula densifolia Gill.* (4,3) > *Russula foetens Fr.* (1,6) > *Fomes fomentarius (L.:Fr.) Gill.* (1,5) > *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing.* (0,9). Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что мощным поставщиком металлов в грибы является не только почва, но и атмосферный воздух.

В целом, для изученных грибов общей закономерности в биологическом накоплении ТМ не выявлено. КБП одного и того же элемента для разных видов грибов имеет очень большой размах варьирования. Для *Russula densifolia Gill.* Cu является элементом сильного накопления, для ос-

тальных грибов – элементом слабого накопления и среднего захвата, а для трутовиков-сапротрофов - элементом слабого захвата. Для 75,0 % грибов Zn - элемент слабого захвата, а Pb – элемент сильного накопления, а для 25 % грибов Pb и Zn являются элементами слабого накопления и среднего захвата.

Cd для *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing.* является элементом сильного накопления, для остальных – элементом энергичного накопления.

Co и Cr для *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing., Fomes fomentarius (L.:Fr.) Gill.*) являются элементами слабого захвата, для остальных - элементами слабого накопления и среднего захвата.

Ni для *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing.* является элементом слабого захвата, для остальных грибов - элементом слабого накопления и среднего захвата, а для *Agaricus campestris (Schaefer.) Fr., Amanita pantherina (Fr.) Secr.* и *Russula rubra Fr.* – элементом сильного накопления.

Выводы:

1. В боровых песках сосновых боров Семипалатинского Прииртышья, относящихся к категории фоновых почв, содержание подвижных форм тяжелых металлов положительно коррелирует с их валовым содержанием. Формирование химического состава боровых песков находится под влиянием не только эндогенных факторов (состава и свойств материнских пород, количество гумуса и карбонатов), но и в определенной степени экзогенных факторов, таких как климатические условия территории, промышленные выбросы и наличие источников загрязнения, а также биотических факторов.

2. Равнинные боровые пески сосновых боров в окрестностях города Семей, сел Долонь и Сосновка Бескарагайского района и бугристые боровые пески в Бородулихинском районе и в окрестностях города Семей носят полиэлементный характер загрязнения и отличаются повышенными концентрациями меди, цинка, свинца, кадмия, кобальта, хрома, никеля, бериллия и ванадия.

3. Растения сосновых боров Семипалатинского Прииртышья накапливают тяжелые металлы в высоких концентрациях, основное поглощение идет за счет подвижных форм металлов, а также за счет их поступления из атмосферы, что подтверждают рассчитанные коэффициенты накопления. Накопление тяжелых металлов растениями находится в зависимости от их жизненной формы. В фитомассе деревьев преобладают концентрации цинка и кадмия. В фитомассе травянистых растений осуществляется большее накопление меди, свинца хрома, никеля, бериллия, марганца, кобальта и стронция, чем в кустарниках и деревьях, что связано с уровнем организации анатомо-морфологической структуры и физиолого-биохимических функций растений, степенью адаптации их к условиям среды, характером корневых систем, глубиной проникновения корней в почву и различным объемом почвы, из которого растение усваивает тяжелые металлы.

4. Травянистые растения из семейства осоковые (*Cyperaceae J. St. Hill.*), ворсянковые (*Dipsacaceae Lindl.*), тутовые (*Moraceae Lindl.*), подорожниковые (*Plantaginaceae Lindl.*) накапливают тяжелые металлы по акропетальному типу, а растения из семейства капустные (*Brassicaceae Burnett*) и зонтичные (*Umbelliferae Moris.*) – по базипетальному типу, вероятнее всего, за счет нарушения функций корневого барьера, о чем свидетельствует коэффициенты перераспределения.

5. Установлено, что к растениям-исключателям относятся травянистые растения из семейства осоковые (*Cyperaceae J. St. Hill.*), ворсянковые (*Dipsacaceae Lindl.*), тутовые (*Moraceae Lindl.*), подорожниковые (*Plantaginaceae Lindl.*), а к растениям-концетраторам - представители семейства капустные (*Brassicaceae Burnett*) и зонтичные (*Umbelliferae Moris.*).

6. Исходя из потенциальной биогеохимической подвижности металлов, согласно рядам биологического поглощения, для растений сосновых боров Семипалатинского Прииртышья элементом энергичного накопления является кадмий. Медь, цинк, свинец, кобальт, никель, стронций, марганец в той или иной мере являются элементами сильного накопления, а хром - слабого накопления и среднего захвата. Существенную роль в общем круговороте веществ в лесной экосистеме играют кадмий, стронций и цинк.

7. Для изученных грибов общей закономерности в биологическом накоплении металлов не выявлено. Для 91% изученных грибов кадмий является элементом энергичного накопления. Для *Laetiporus sulphureus (Buul. Fr.) Bond. Et. Sing.* и *Russula densifolia Gill.* элементами сильного накопления являются медь и кадмий. Для остальных грибов медь – элемент слабого накопления и среднего захвата, а для трутовиков-сапротрофов - элемент слабого захвата. Для разных видов грибов в группу элементов слабого накопления и среднего захвата входят также цинк, свинец, кобальт, хром, никель, марганец; элементами слабого захвата являются цинк, кобальт, хром, никель, ванадий, бериллий, стронций, марганец. Для всех видов грибов элементами очень слабого захвата являются ванадий, бериллий, стронций. Медь, свинец, кадмий и никель, накапливающиеся в грибах, активно участвуют в биогеохимическом круговороте веществ, а такие элементы как кобальт, хром, цинк, ванадий, бериллий, стронций и марганец, менее доступны для грибов, и роль их в биогеохимическом круговороте незначительна.

8. Почвенно-растительный покров сосновых боров характеризуется свинцово-кадмиевой, кадмиевой, кадмиево-свинцово-медной геохимической структурой и специализацией, что в полной мере отображает специфику промышленного загрязнения Восточного Казахстана.

9. Несмотря на то что значительная территория сосновых боров находится в зоне влияния населенных пунктов Восточно-Казахстанской области, биогеохимическая оценка их состояния позволяет охарактеризовать почвенно-климатические условия на данной территории как удовлетворительные для произрастания насаждений сосны обыкновенной II-V классов бонитета. Древостой сосновых боров характеризуется достаточно высокой емкостью биологического поглощения тяжелых металлов с вовлечением фитомассой древостоя в биогеохимический круговорот до 5,860 т/га металлов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Панин М. С., Сибиркина А. Р. Техногенное загрязнение медью водосборной площади бассейна реки Иртыш в пределах территории Казахстана // Геохимия. – 2000. – №2. – С. 187-196.

2. Сибиркина А. Р. Аккумуляция марганца грибами соснового бора в условиях Семипалатинского Прииртышья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2009. – № 2 (22). – С. 299-301.

3. Сибиркина А. Р. Содержание тяжелых металлов в песках соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2011. – № 2. – С. 46-52.

4. Сибиркина А. Р. Содержание Cu и Zn в травах соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Мир науки, культуры, образования. – 2011. – №5 (30). – С. 231-235.

5. Сибиркина А. Р. Содержание Cd в травах соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 1; URL: www.science-education.ru/101-5440 (дата обращения: 07.05.2014)

6. Сибиркина А. Р. Аккумуляция хрома грибами соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 2; URL: www.science-education.ru/102-5449 (дата обращения: 06.05.2014)

7. Сибиркина А. Р. Содержание бериллия в органах сосны обыкновенной ленточных боров Прииртышья Республики Казахстан // Сибирский экологический журнал. – 2012. – №2. – С. 277-284.

8. Сибиркина А. Р. Особенности накопления бериллия различными видами трав соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3; URL: www.science-education.ru/103-6028 (дата обращения: 09.05.2014)

9. Сибиркина А. Р. Содержание Cr в песках соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL: www.science-education.ru/104-6477 (дата обращения: 05.05.2014)

10. Сибиркина А. Р. Содержание Pb в травах соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Мир науки, культуры, образования. – 2012. – №2 (33). – С. 346-349.

11. Сибиркина А. Р. Содержание никеля в травах соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2012. – Сер. 3. – Вып. 3. – С. 38-44.

12. Сибиркина А.Р. Биогеохимические особенности накопления соединений тяжелых металлов травянистыми растениями соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5; URL:http://www.science-education.ru/111-10331 (дата обращения: 08.05.2014)

13. Сибиркина А. Р. Содержание кадмия в органах сосны обыкновенной ленточных боров Прииртышья Республики Казахстан // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2013. – № 2. – С. 130-137.

14. Сибиркина А. Р. Биогеохимические особенности накопления соединений тяжелых металлов различными сообществами сосновых боров Семипалатинского Прииртышья // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: http://www.science-education.ru/117-13005 (дата обращения: 08.05.2014).

Прочие публикации

15. Панин М. С., Сибиркина А. Р. Влияние техногенеза на содержание тяжелых металлов в реках бассейна Иртыша // Аграрная наука на рубеже веков. Тезисы докладов Международной конференции. – Акмола. – 1997. – С. 82.

16. Панин М. С., Сибиркина А. Р. Техногенное загрязнение цинком водосборной площади бассейна Иртыша в пределах территории Казахстана // Вестник университета «Семей». – Семипалатинск. – 1998. – № 2. – С. 76-82.

17. Панин М. С., Сибиркина А. Р. Техногенное загрязнение кадмием водосборной площади бассейна Иртыша в пределах территории Казахстана // Вестник университета «Семей». – Семипалатинск. – 1998. – № 3. – С. 131-141.

18. Сибиркина А. Р. Анализ изменения содержания и накопления меди и цинка в воде рек бассейна Иртыша в пределах территории Республики Казахстан // Тяжелые металлы, радионуклиды и элементы-биофилы в окружающей среде. Доклады III Международной научно-практической конференции, 7-9 октября 2004 года. – Семипалатинск. – 2004. – Т. 1. – С. 469-478.

19. Сибиркина А. Р. Формирование теоретических и методологических основ понимания биогеохимических изменений в окружающей среде при изучении экологических дисциплин в вузе // Актуальные проблемы геохимической экологии. Материалы V Международной биогеохимической школы. Семипалатинский государственный педагогический институт, 8-11 сентября 2005 года. – Семипалатинск. – 2005. – С. 513-515.

20. Сибиркина А. Р. Травянистый покров соснового бора Семипалатинского Прииртышья как индикатор современного сукцессионного процесса в окружающей среде // Актуальные проблемы экологии и природопользования в Казахстане и сопредельных территориях. Материалы II Международной научно-практической конференции. Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова, 23-24 октября 2007 года. – Павлодар. – 2007. – Т.1. – С. 233-235.

21. Сибиркина А. Р. Содержание цинка в грибах соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. Доклады V Международной научно-практической конференции. Семипалатинский государственный педагогический институт, 15-18 октября 2008 г. – Семей. – 2008. – Т.2. – С. 65-71.

22. Сибиркина А.Р. Содержание соединений меди и цинка в органах сосны обыкновенной и в плодовых телах грибов рода Russula (Сыроежки) // Материалы IV ежегодной научно-методической конференции преподавателей. Семипалатинский государственный педагогический институт, 2-4 апреля 2008 года. – Семей. – 2008. – С. 152-153.

23. Сибиркина А.Р. Медь в грибах соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Высшее образование и аграрная наука – сельскому хозяйству. Материалы Международной научно-практической конференции. Семипалатинский государственный университет им. Шакарима, 21-24 мая 2009 года. – Семей. – 2009. – Т.2. – С. 56-59.

24. Панин М. С., Сибиркина А. Р. Кадмий в грибах соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Геохимия биосферы. V Международное совещание (сборник материалов и тезисов). – Новороссийск. – 2009. – С. 44-46.

25. Сибиркина А. Р. Содержание Be, Ni, V в грибах соснового бора Семейского Прииртышья // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Семипалатинский государственный педагогический институт, 4-7 февраля 2010 года. – Семей. – 2010. – Т. I. – С. 334-338.

26. Сибиркина А. Р. Содержание кадмия в листьях кустарниковых растений соснового бора // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. Материалы VII Международной научно-практической конференции. Семипалатинский государственный педагогический институт, 4–8 октября 2012 года. – Семей. – 2012 г. – Т. I. – С. 307-310.

27. Сибиркина А. Р. Особенности накопления ванадия различными видами травянистых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде. Материалы VII Международной научно-практической конференции. Семипалатинский государственный педагогический институт, 4–8 октября 2012 года. – Семей. – 2012 г. – Т. I. – С. 311-314.25.

28. Сибиркина А.Р. Содержание свинца в листьях кустарниковых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья республики Казахстан // Проблемы геоэкологии, экологической геологии и рационального природопользования: Материалы Всероссийской научной конференции к 10-летию кафедры геоэкологии Саратовского Государственного Университета имени Н.Г. Чернышевского, 14-16 ноября 2012 года. – Саратов: ИЦ «Наука», 2012. – С. 69-73.

29. Сибиркина А. Р., Лихачев С. Ф. Аккумуляция Ni в почвах соснового бора Семипалатинского Прииртышья Республики Казахстан // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии. Материалы I Международной заочной научно-практической конференции, 19 февраля 2013 года. – М.: Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. – С. 135-138.

30. Сибиркина А. Р. Содержание Cr в листьях кустарниковых растений соснового бора // Вестник Семипалатинского государственного университета имени Шакарима. – Семей. – 2013. – Т.1. – №1 (61) – С. 98-100.

31. Сибиркина А. Р. Биогеохимические условия формирования почвенного покрова соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 31 января 2013 г.: в 13 частях; Часть 13; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 127-128.

32. Лихачев С. Ф., Сибиркина. А. Р. Особенности накопления кобальта различными видами травянистых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Экологический мониторинг и биоразнообразие. – 2013. – №1 (1). – С. 26-28.

33. Сибиркина А. Р. Биогеохимические особенности накопления тяжелых металлов растениями соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Вопросы образования и науки в XXI веке: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 29 апреля 2013 г.: в 11 частях. Часть 8; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 118-120.

34. Сибиркина А. Р., Лихачев С. Ф. Содержание свинца в грибах, произрастающих в Семипалатинском сосновом бору (Республика Казахстан) // Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 28 июня 2013 г.: в 7 частях. Часть 1; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 143-144.

35. Сибиркина А. Р., Лихачев С. Ф. Биогеохимические особенности накопления тяжелых металлов грибами соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Наука и образование в XXI веке: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 сентября 2013 г.: в 34 частях. Часть 26; М-во обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 125-126.

36. Сибиркина А. Р. Биогеохимические особенности содержание тяжелых металлов в песках соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Наука и образование: сборник научных трудов по материалам IV Международной научно-практической конференции 30-31 октября 2013 г. – Мюнхен, Германия. – С. 23-28. (396 с.)

37. Сибиркина А. Р. Биогеохимические особенности содержания тяжелых металлов в органах древесных растений семипалатинского соснового бора // Вестник Семипалатинского государственного университета имени Шакарима. – Семей. – 2013. – №4 (64). – С. 15-19.

38. Сибиркина А. Р. Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в листьях кустарниковых растений соснового бора Семипалатинского Прииртышья // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2013. – Часть I. – № 11 (58). – С. 74-77.

39. Сибиркина А.Р. Особенности содержания цинка, стронция и марганца в органах и тканях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris L.*) соснового бора Семипалатинского Прииртышья (Республика Казахстан) // Вестник ИГПИ им. П.П. Ершова. – 2014. – №4 (16). – С. 97-100.

Отпечатано и сброшюровано в
ООО «Полиграф-Мастер»
г. Челябинск, ул. Академика Королева, 26
тел.: (351) 281-01-64, 281-01-65, 281-01-66
E-mail: P-master74@mail.ru
Государственная лицензия на издательскую деятельность
ИД № 02758 от 04.09.2000 г.
Государственная лицензия на полиграфическую деятельность
ПД № 11-0092 от 17.11.2000 г.
Подписано в печать 21.06.2014 г.
Формат 60*84 $^{1}/_{16}$. Бумага офсетная.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 930.