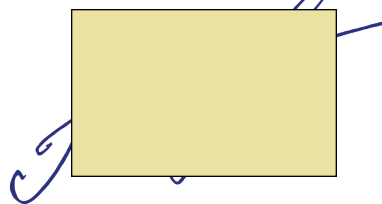


*На правах рукописи*



**ТИМОФЕЕВ Иван Вячеславович**

**ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ И МЕТАЛЛОИДЫ В ПОЧВАХ И ДРЕВЕСНЫХ  
РАСТЕНИЯХ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ДЖИДИНСКОГО W-Mo (РОССИЯ) И  
ЭРДЭНЭТСКОГО Cu-Mo (МОНГОЛИЯ) КОМБИНАТОВ**

25.00.23 – физическая география и биогеография, география почв  
и геохимия ландшафтов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва-2016

Работа выполнена на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: доктор географических наук  
**Кошелева Наталья Евгеньевна**

Официальные оппоненты: **Опекунова Марина Германовна**, доктор географических наук, профессор кафедры геоэкологии и природопользования Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета

**Янин Евгений Петрович**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник группы «Научное наследие В.И. Вернадского и его школы» Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского

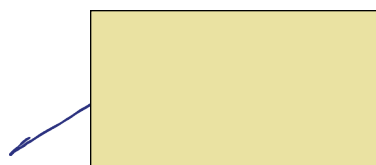
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Защита состоится «2» марта 2017 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.13 на базе Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, д. 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, 18 этаж, аудитория 1807.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: Москва, Ломоносовский проспект д. 27, А8 и на сайте Интеллектуальной Системы Тематического Исследования Научно-технической информации (ИСТИНА МГУ), <http://istina.msu.ru>, автореферат также размещен на официальном сайте ВАК (<http://www.vak.ed.gov.ru>).

Автореферат разослан «28» декабря 2017 г.

Исполняющий обязанности ученого секретаря диссертационного совета



Е.И. Голубева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях роста населения неизбежно увеличиваются объемы потребления минерально-сырьевых ресурсов, добыча которых масштабно влияет на состояние окружающей среды и приводит к необратимым изменениям почв, вод, растительности и атмосферы (Авдонин, 1984; Авессаломова, 1986, 2004; Емлин, 1991; Опекунова, 2013, Перельман, Касимов, 1999; Сает и др., 1990; Язиков, 2006; Hudson-Edwards, Jamieson, Lottermoser, 2011; Lavid, Barkay, Tel-Or, 2001; Serbula и др., 2012). Освоение месторождений цветных металлов способствует возникновению городов-рудников и городов-заводов. Экологические последствия этой деятельности можно оценить на основе изучения химического состава почв, являющихся геохимическим барьером на пути миграции тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в грунтовые воды, и древесной растительности, выступающей в роли естественного универсального фильтра, аккумулирующего и инактивирующего многие токсичные компоненты техногенных выбросов (Автухович, 1999; Касимов, 2013; Касимов, Никифорова, 2004; Опекунова, 2013; Черненькова, 2002; Янин, 1993; Методические..., 1982; Геохимические..., 1998; Beckett, Freer-Smith, Taylor, 2000; WHO, 2003; Mapping..., 2011).

Оценка экологического состояния окружающей среды горнорудных районов с применением геохимических методов началась в 1970-х годах с исследований, проводимых под руководством Ю.Е. Саета и Э.К. Буренкова. Эти работы опирались, с одной стороны, на разработки А.П. Виноградова, В.В. Ковальского, В.А. Ковды и их последователей, а с другой – на опыт поисковой геохимии, основы которой были заложены С.В. Григоряном, А.П. Солововым, А.Н. Еремеевым, Л.Н. Овчинниковым, А.А. Сауковым и др. Существенный вклад в решение этих проблем внесли Е.П. Янин, И.Л. Башаркевич, А.А. Волох, А.А. Головин, И.А. Морозова, Н.И. Несвижская, Б. А. Ревич и др.

Диссертационная работа содержит комплексную сравнительную ландшафтно-геохимическую оценку техногенной трансформации горнопромышленных ландшафтов в зоне влияния Джидинского W-Mo (ДВМК) и Эрдэнэтского Cu-Mo комбинатов с исследованием широкого перечня ТММ; характеристикой их пространственного распределения в поверхностных (0-10 см) горизонтах почв, фоновых и городских катенах, в ассимилирующих и многолетних органах древесной растительности и диагностикой латеральных и радиальных педогеохимических барьеров. Сульфидные месторождения разрабатываемых Джидинского и Эрдэнэтского рудных полей относятся к эндогенно-магматогенной серии, гидротермальной группе, плутогенному классу, типу штокверковых и жильных высокотемпературных (Смирнов, 1976). Они ассоциируются с кислыми, средними и щелочными магматическими комплексами и формировались на позднеинтрузивной и постинтрузивной стадиях.

Исследования в этих горнопромышленных центрах начались в 1960-х гг. поисковыми геологическими экспедициями (Ваул, 1968; Коминек, 1969). За прошедший

50-летний период выявлены геологические особенности территорий, специфика производственного цикла, изучены процессы современного минералообразования и химический состав отходов в хвостохранилищах, дана экологическая и экономическая оценка городов. Вопросы эколого-геохимического состояния ландшафтов и зонирования территорий исследованы слабо.

**Цель и задачи.** *Цель работы* – оценка техногенной геохимической трансформации почв и древесных растений горнопромышленных центров в бассейне р. Селенги под влиянием разработки W-Mo и Cu-Mo месторождений. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проанализировать техногенные и природные факторы, определяющие условия развития и антропогенной геохимической трансформации почв и древесной растительности в W-Mo и Cu-Mo горнопромышленных центрах;
- определить уровни накопления ТММ в поверхностных горизонтах почв различных функциональных зон и закономерности их пространственного распределения в зависимости от почвенно- и ландшафтно-геохимических факторов;
- выявить основные черты латеральной и радиальной дифференциации почв горнопромышленных центров по содержанию ТММ, основные типы геохимических барьеров и изменение их емкости при техногенном воздействии;
- проанализировать микроэлементный состав ассимилирующих и многолетних органов древесных растений, его изменение под влиянием загрязнителей и связь с концентрацией ТММ в почвах;
- выполнить эколого-геохимическую оценку загрязнения компонентов ландшафтов в зонах влияния ДВМК и ГОК «Эрдэнэт» и провести их районирование.

**Материалы и методы исследования.** Основой для написания диссертации послужили материалы, собранные в ходе летних полевых сезонов (2010-2013 гг.) с опробованием поверхностных горизонтов почв, органов древесных растений и заложением катен. В качестве локального фона использовали почвенные пробы, отобранные на вершинах и пологих склонах (до 2°) холмов в долине рр. Модонкуль и Эрдэнэтий-Гол, а глобального – кларки литосферы, рекомендованные в работе (Касимов, Власов, 2015) и среднемировые значения в почвах (Kabata-Pendias, 2011). Для подробного анализа выбрано 16 приоритетных загрязнителей с атомной массой больше 50 ед. и типичных для W-Mo и Cu-Mo месторождений (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010; Саэт и др., 1990; Смирнова, Плюснин, 2013). Валовое содержание ТММ определялось во ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского (ВИМС) масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой на приборах «Elan-6100» и «Optima-4300». Всего было проанализировано 521 проба почв и техногенных почвенных образований и 155 – растительного материала.

При обработке данных рассчитывались кларки концентрации и рассеяния (КК

и  $KP$ ), коэффициенты концентрации и рассеяния относительно местного ( $EF_l$  и  $DF_l$ ) и глобального ( $EF_g$  и  $DF_g$ ) фонов, суммарный ( $Z_c$ ) и интегральный ( $ИПЗ$ ) показатели загрязнения, биогеохимической трансформации ( $Z_v$ ) и др. Статистическая обработка данных включала расчет основных статистических показателей, кластерный и многофакторный регрессионный анализы в пакетах Statistica 10 и S-Plus. Среди картографических методов использовались кригинг, морфометрический анализ цифровой модели местности, карт зон затопления и др., реализованные в ГИС-пакетах MapInfo, ArcGIS и Surfer.

**Научная новизна работы.** Впервые проведено функциональное зонирование горнопромышленных центров Закаменск и Эрдэнэт и составлены карты родов элементарных ландшафтов с помощью разработанной автором методики автоматизированного построения карт путем последовательной обработки цифровой модели местности. Охарактеризована геохимическая специализация фоновых почв (в Закаменске: дерново-таежных, серогумусовых метаморфизованных, аллювиальных; в Эрдэнэте: подтипы каштановых) и органов древесной растительности: березы плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukaczew*), лиственницы сибирской (*Lárix sibírica Ledeb.*) и гибридов тополя (*Populus*). На основе локальных коэффициентов концентрации ( $EF_l$ ) и рассеяния ( $DF_l$ ), рассчитанных по отношению к индивидуальному для каждой почвообразующей породы фоновому значению, установлены приоритетные элементы-загрязнители почв в различных функциональных зонах. Выявлены пространственные закономерности и факторы накопления ТММ и их парагенетические ассоциации, основные черты латеральной и радиальной дифференциации почв по содержанию ТММ, типы латеральных и радиальных геохимических барьеров и изменение их емкости под техногенным воздействием. Для характеристики пространственных изменений в условиях аккумуляции ТММ и выявления зон аккумуляции построены карты латеральных геохимических барьеров.

Полиэлементное загрязнение почвенного покрова и растительности в условиях природных литогеохимических аномалий оценивалось с помощью комплекса интегральных геохимических индексов – суммарного ( $Z_c$ ) и интегрального ( $ИПЗ$ ) показателей, которые характеризуют степень техногенной трансформации почв и дают более точную оценку их загрязнения с учетом классов опасности элементов и повышенного природного фона ТММ, а также коэффициента биогеохимической трансформации микроэлементного ( $МЭ$ ) состава растений ( $Z_v$ ). На основе соотношений  $Fe/Mn$ ,  $Pb/Mn$ ,  $Zn/Cu$  и акропетального коэффициента определено экологическое состояние древесной растительности. Получена эколого-геохимическая оценка загрязнения компонентов ландшафтов и составлена серия моно- и полиэлементных геохимических карт на изучаемые территории.

**Личный вклад соискателя.** Автором проведено геохимическое опробование

почв и органов древесных растений горнопромышленных центров; выполнено определение основных физико-химических свойств почв (гранулометрического состава, *pH*, содержания органического углерода); статистическая обработка и обобщение полевых и лабораторных материалов; с помощью ГИС-технологий составлены моно- и полиэлементные геохимические карты. Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом фактического материала, полученного в сертифицированных лабораториях современными химико-аналитическими методами, и методами его анализа и обработки.

**Положения, выносимые на защиту.** 1. Приуроченность горнопромышленных центров Закаменска и Эрдэнэнта к природным геохимическим аномалиям проявляется в высокой изменчивости содержания рудных элементов (W, Mo, Cu) и их спутников (Bi, As, Sb) в поверхностных горизонтах фоновых почв, сформированных на породах кембрийского, пермского, триасового и четвертичного возрастов. Разработка гидротермальных W-Mo и Cu-Mo месторождений привела к многократному увеличению концентраций в почвах халькофильных элементов Bi, W, Cd, Sn, Cu, Zn, Mo, Sb, Pb, As и Bi, Cu, Sb, As, Cd, Bi соответственно. Перечень загрязнителей и их пространственная дифференциация обусловлена уровнем техногенной нагрузки, при ее снижении начинают влиять почвенно- и ландшафтно-геохимические условия.

2. При техногенном воздействии и разрушении хвостохранилищ современными экзогенными процессами контрастность латеральной дифференциации ТММ возрастает в разы и десятки раз и приводит к накоплению в подчиненных ландшафтах халькофильных элементов: в Закаменске Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb, Bi и в Эрдэнэте Cu, Sb, Mo, Pb, Bi, W. ТММ в Закаменске закрепляются на сорбционно-седиментационном (Cr, Ni, Cu, W, Pb, Bi, As, Sr), хемосорбционном (V, Co, Ba), глеевом (Mo, Cd, Sb), органо-минеральном (Sn) латеральных геохимических барьерах, а в Эрдэнэте – сорбционно-седиментационном (Cu, Mo), хемосорбционном (V, As, Cr, Ni, Ba), кислотно-основном (Sr, W, Sn).

3. При техногенном загрязнении ландшафтов анионогенными рудными элементами (W, Mo) и элементами-спутниками (As, Sn, Sb) древесные растения сохраняют катионофильную геохимическую специализацию с усилением акропетальности распределения ТММ в 1,5-50 раз. Ассимилирующие органы лиственницы сибирской, березы плосколистной и гибридов тополя обладают близким микроэлементным составом, что свидетельствует о слабой видовой избирательности поглощения. Наиболее информативным биоиндикатором является хвоя лиственницы сибирской.

4. Рудная специализация Джидинского и Эрдэнэнтского рудных полей, технологии их разработки и особенности размещения отходов привели к чрезвычайно опасной экологической ситуации в Закаменске, почвенный покров более половины его территории загрязнен W, Mo, Zn, As, Pb, Cd, Cu, Sb, Bi. В Эрдэнэте экологическая ситуация



неопасная, в промышленной зоне локальные участки загрязнены Cu, Mo. Древесная растительность испытывает чрезвычайно высокий в Закаменске и средний в Эрдэнэте уровень биогеохимической трансформации с нарушениями процессов фото- и ферментосинтеза, а также ускоренным накоплением токсичных элементов по сравнению с эссенциальными.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Диссертация содержит геохимические данные о современной экологической ситуации в Закаменске и Эрдэнэте, научное объяснение и характеристику миграции и пространственного распределения ТММ в горнопромышленных центрах. Исследования проводились при поддержке РФФИ (проект №13-05-92221-Монг\_а «Геохимическая оценка экологического состояния природной среды в крупных горнопромышленных центрах бассейна р. Селенги»); РГО (госконтракт № 11.519.11.5008 «Интегральная оценка экологического состояния регионов и городов России»; № 06/2013-П1 и № 01/2014-П1 «Комплексная экспедиция Селенга-Байкал (3 и 4 этапы)»; № 05/2013-П1 «Интегральная оценка экологического состояния регионов и городов России», № 13-05-41191 «Интегральная оценка и картографирование качества городской среды на основе анализа ландшафтно-геохимических данных»); РФФИ (проект №14-27-00083 «Пространственно-временной анализ миграции химических элементов и соединений в природных и антропогенных ландшафтах»); Совместной российско-монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ (СРМКБЭ).

Материалы использованы в научных отчетах по проектам и включены в ряд учебных курсов кафедры геохимии ландшафтов и географии почв («Геохимия природных и техногенных ландшафтов», «Экогеохимия городских ландшафтов»). Результаты и методические подходы могут найти применение в ландшафтно-геохимических исследованиях горнопромышленных центров в других регионах России.

**Апробация работы и публикации.** По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 5 статей журналах из перечня Web of Science. Материалы представлены на 11 Международных и 3 Всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на 174 страницах печатного текста, содержит 50 рисунков, 22 таблицы, 6 приложений на 35 страницах. Список литературы насчитывает 330 наименований, в том числе 102 на иностранных языках.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю Н.Е. Кошелевой за ценные, конструктивные указания, помощь в работе и предоставленные материалы; Н.С. Касимову за консультации, ценные замечания и обсуждение результатов; П.Д. Гунину, С. Амгалану, И.А. Павлову, сотрудникам Института географии АНМ, СРМКБЭ, БИП СО РАН за помощь в проведении полевых работ; аналитикам геогра-

фического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Е.В. Терской, Л.В. Добрыдневой и сотрудникам ВИМС; М.И. Богданову, А.В. Старицыну, О.К. Смирновой, С.П. Гавриловой, Л.А. Вайсбергу за предоставленные научные и фондовые материалы и оказанное содействие; коллегам-сотрудникам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв; руководителям АО «Институт экологического проектирования и изысканий» В.Ю. Слободяну и И.А. Королёву; моим родителям, сестре и жене за всестороннюю помощь и поддержку.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Объекты исследования

*Физико-географические условия.* Горнопромышленные центры Закаменск и Эрдэнэт расположены в бассейне крупнейшей из впадающих в оз. Байкал р. Селенги, на ее притоках рр. Модонкуль и Эрдэнэтий-Гол, соответственно (рис. 1). Климат резко континентальный с холодной зимой ( $-15 - -25^{\circ}\text{C}$ ) и теплым ( $+15 - +20^{\circ}\text{C}$ ), влажным летом, когда выпадает 60-70% годовой суммы осадков (Береснева, 2006). Ветер, являясь важным фактором атмосферного переноса тонких частиц, в обоих районах преимущественно западный, северо-западный и северный (рис. 1).



Рис. 1. Объекты исследования и повторяемость (%) направлений ветра

Закаменск расположен в 460 км на юго-запад от г. Улан-Удэ, в южной части Монголо-Сибирского горного пояса (Уфимцев, 1991) на сильнорасчлененной территории с относительными высотами водораздельных гребней над тальвегами до 300-400 м (Зиновьева и др., 2011). В геологическом плане город приурочен к границе карбонатно-терригенных толщ нижнего палеозоя Джидинского синклиория и интрузивов гранитоидов Модонкульского массива (Папов, 2007). В автономных позициях и на крутых склонах развиты горные дерново-таежные и дерново-карбонатные почвы под лесной растительностью, представленной лиственницей сибирской и березой плосколистной с



подлеском из рододендрона даурского, шиповника иглистого, голубики обыкновенной. На нижних частях пологих склонов и в долинах рр. Модонкуль и Джида под луговой и лугово-болотной растительностью распространены дерновые лесные почвы (Ногина, 1964), а вдоль русла – аллювиально-луговые (Убугунов и др., 1998; 2012).

Эрдэнэт расположен на междуречье рр. Селенги и Орхона в 340 км к северо-западу от г. Улан-Батор в Орхон-Селенгинском прогибе Селенгино-Витимского вулканического пояса (Гаврилова и др., 2010). Территория представляет собой полого-холмистую равнину в пределах активизированных в палеозое и мезозое раннекаледонских структур Селенгино-Яблоновой складчатой системы. Ландшафты представлены полынно-разнотравно-злаковыми степями с каштановыми и темно-каштановыми слабозасоленными почвами, в поймах рр. Эрдэнэтий-Гол, Гавелин, Зуна-Гол в виде узкой полосы распространены лугово-каштановые и луговые слабозасоленные суглинистые почвы (Карпель и др., 1975). На вершинах склонов под лесной растительностью, представленной лиственницей сибирской (Востокова, Гунин, 2005), формируются слаборазвитые почвы темно-каштанового типа.

*Техногенное воздействие.* ДВМК с 1934 по 2001 гг. разрабатывал штокверковое Мо (Первомайское), сульфидно-W (Инкурское и Холтосонское рудные и россыпные) и Au (Мыргэншено, Ивановка) месторождения. 44,5 млн. тонн отходов размещены в Джидинском, рекультивированном в 2011 г. аварийном, и Барун-Нарынском хвостохранилищах. Из последнего с 2010 г. ЗАО «Закаменск» ведет переработку хвостов и формирует новое место складирования в долине р. Зун-Нарын. ГОК «Эрдэнэт» ведет добычу карьерным способом с 1976 г. по настоящее время. Отходы производства складываются в долину р. Зуна-Гол, перегороженную плотиной высотой 85 м.

К источникам загрязнения ландшафтов в Закаменске относятся: ТЭЦ, где используется мазут; предприятия по заготовке и переработке древесины, литью чугуна, стали, бронзы, обработке камней, производству продовольственных товаров и строительных материалов. В Эрдэнэте функционируют: КОО «Эрдмин», производящее чистую катодную Cu; ТЭЦ, использующая бурый уголь из разрезов Шарынгол и Баганур; компания «Эрдэнэт Хивс» по производству шерстяных ковров, одежды из овечьей и верблюжьей шерсти, кашемира и войлока.

*Функциональное зонирование.* В горнопромышленных центрах выделены пять зон (рис. 2): две селитебных – с многоэтажной и одноэтажной (дачной в Закаменске и юрточной в Эрдэнэте) застройкой; промышленная; транспортная; пастбищ (Эрдэнэт) или природно-рекреационная (Закаменск). К фоновым территориям отнесены вершины и пологие склоны холмов в долине рр. Модонкуль и Эрдэнэт-Гол.

## **Глава 2. Методы и материалы**

Исследования основываются на материалах, полученных в ходе нескольких полевых сезонов в период с 2011 по 2013 гг. В 2012-2016 гг. осуществлялись

химико-аналитические работы и анализ данных с использованием сравнительно-географического, статистических, геохимических и картографических методов.

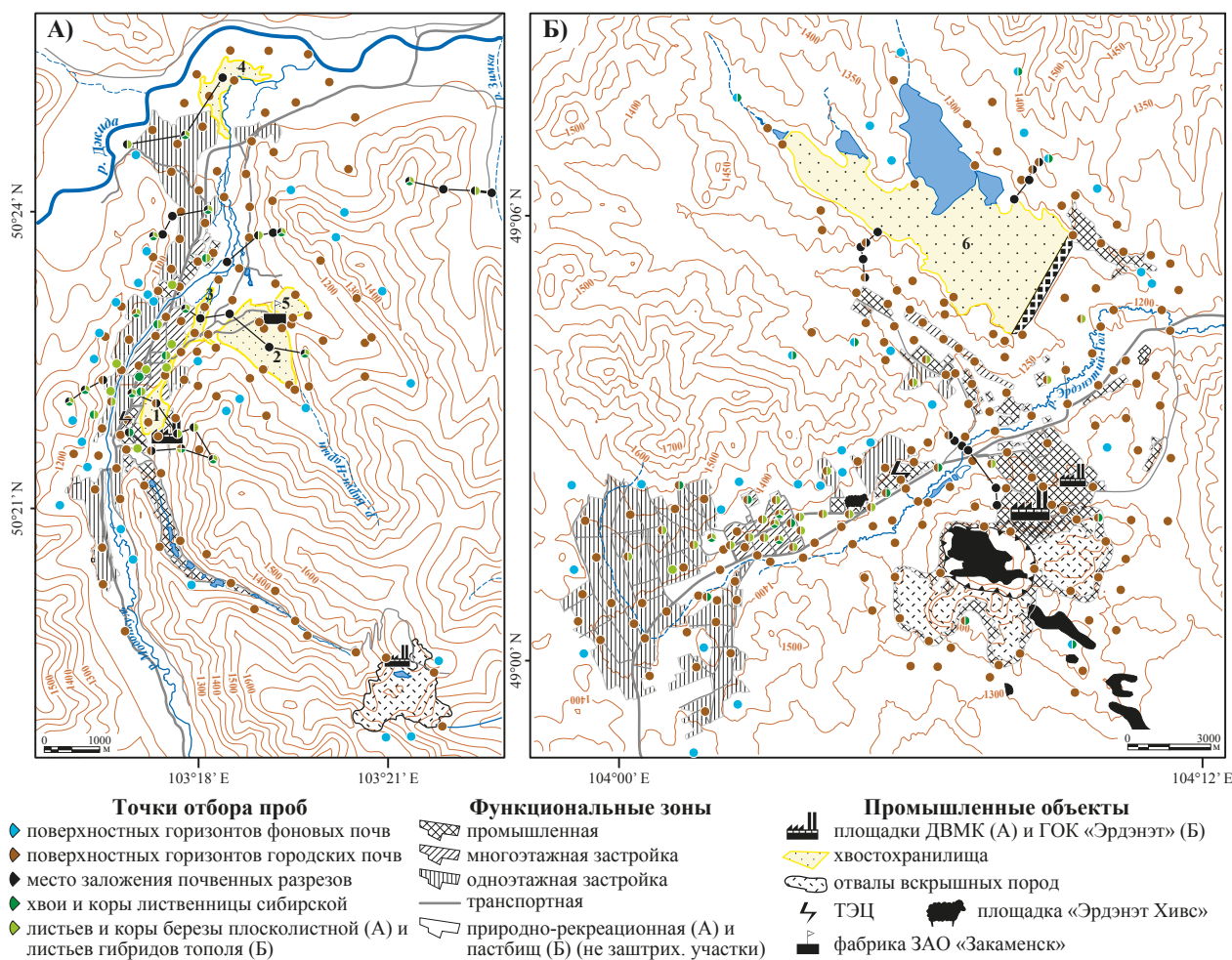


Рис. 2. Функциональное зонирование Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б) и точки отбора проб. Хвостохранилища: 1 – Джидинское; 2 – Барун-Нарынское; 3 – аварийное; 4 – Модонкульское; 5 – Зун-Нарынское; 6 – Эрдэнэтское

*Полевые исследования.* Смешанные пробы (Закаменск – 132, включая 27 фоновых; Эрдэнэт – 226, включая 32) отбирались методом конверта из поверхностного (0-10 см) горизонта по сетке с шагом 500-700 м (рис. 2). Для изучения латеральной и радиальной миграции ТММ в районе Закаменска заложено 7 катен с 31 почвенным разрезом в основных элементарных ландшафтах, а в районе Эрдэнэта – 6 с 18, соответственно. Образцы (106 в Закаменске; 57 в Эрдэнэте) отбирались по генетическим горизонтам. Опробование органов деревьев проводилось в различных функциональных зонах по методике Н.В. Терехиной (2010). В Закаменске собрано по 32 образца листьев и коры березы плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukaczev*) и по 21 – хвой и коры лиственницы сибирской (*Lárix sibírica Ledeb.*), а в Эрдэнэте – 29 проб листьев гибридов тополя (*Populus*) и 20 – хвой лиственницы (латинские названия даны по С.К. Черепанову, 1995).

*Химико-аналитические работы.* Валовое содержание 54 ТММ в пробах почв и растительного материала анализировалось масс-спектральным методом с индуктивно-свя-

занной плазмой в ВИМС. Для подробного анализа выбраны загрязнители, относящиеся к I (Zn, As, Pb, Cd), II (Cr, Co, Ni, Cu, Mo, Sb), III (V, Sr, Ba, W) классам опасности (ГОСТ 17.4.1.02-83, 2008), кроме того, рассмотрены Sn и Bi. В Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова автором проведено определение: актуальной кислотности ( $pH$ ); содержания органического углерода методом И.В. Тюрина; гранулометрического состава методом лазерной дифракции на приборе «Analysette 22 comfort». В образцах хвои и коры лиственницы сибирской Закаменска проведено определение зольности согласно ГОСТ 27784-88 (1989).

*Обработка данных.* При обработке полученных данных вычислялись статистические показатели (выборочные средние  $m$ ; ошибки средних, средние квадратичные отклонения  $\sigma$ ; коэффициенты вариации  $C_v$ ; максимальные  $max$  и минимальные  $min$  значения; коэффициенты корреляции  $r$  и др.); кларки концентрации  $KK=C_b/C_c$  и рассеяния  $KP=C_c/C_b$ , где  $C_c$  – кларк литосферы (Касимов, Власов, 2015); глобальные коэффициенты концентрации и рассеяния  $EF_g=C_b/C_g$ ,  $DF_g=C_g/C_b$ , где  $C_g$  – среднемировое значение в почвах (Kabata-Pendias, 2011) или в ежегодном приросте растений суши (Добровольский, 2003); локальные коэффициенты концентрации  $EF_l=C_u/C_b$  и рассеяния  $DF_l=C_b/C_u$ , где  $C_u$  – концентрация элемента в городских образцах; коэффициенты латеральной  $L$  дифференциации, равный отношению содержания ТММ в рассматриваемом ландшафте к его концентрации в автономном, и радиальной  $R$  – отношение концентрации ТММ в почвенном горизонте к его содержанию в почвообразующей породе; суммарный показатель загрязнения  $Z_c=\sum EF_l-(n-1)$ , где  $n$  – число элементов с  $EF_l>1$ ; интегральный показатель экологической опасности  $ИПЗ=\sum(p \cdot C_u/C_g)-(n-1)$ , где  $n$  – число элементов с  $C_u>C_g$ ,  $p$  – коэффициент токсичности (Большаков и др., 1999); коэффициент опасности загрязнения  $K_o=C_u/ПДК$  (ОДК), где ПДК или ОДК – предельно или ориентировочно допустимые концентрации элемента (ГН 2.1.7.2041-06, 2006; ГН 2.1.7.2042-06, 2006; СП 11-102-97, 1997; Херсний чанар..., 2008).

Для растений вычислялись: коэффициент биологического накопления  $KBH_1=l_x/C_s$ ,  $KBH_2=l_x/C$ , где  $l_x$ ,  $C_s$ ,  $C$  – содержание элемента в золе растений, почве, горной породе, соответственно (Уфимцева, Терехина, 2005); коэффициент биогеохимической активности катионогенных  $K_{БХА}$  и анионогенных  $A_{БХА}$  элементов, равный отношению суммы  $KBH_1$  катионогенных и анионогенных элементов к числу  $n$  соответствующих суммированных элементов (Айвазян, Касимов, 1979); акропетальный коэффициент  $A_k=C_o/C_{т.о.}$ , где  $C_o$  – концентрация изучаемого МЭ в исследуемом органе, а  $C_{т.о.}$  – в эталонном (коре); коэффициент биогеохимической трансформации  $Z_v=\sum EF_l+\sum DF_l-(n_1+n_2-1)$ , где  $n_1$ ,  $n_2$  – количество МЭ с  $EF_l>1$  и  $DF_l>1$  (Касимов и др., 2012); отношения концентраций элементов в органах древесных растений  $Fe/Mn$ ,  $Pb/Mn$  и  $Zn/Cu$ .

Парагенетические ассоциации ТММ выявлялись по геохимическим спектрам и дендрограммам, построенным с помощью кластерного анализа (алгоритм Complete

Linkage) в программном пакете Statistica 10. Визуализация почвенно- и биогеохимических данных выполнена методом кригинга в пакетах Surfer 11 и MapInfo 11.5. Природные и антропогенные факторы, обуславливающие пространственные различия в уровнях содержания ТММ в поверхностных горизонтах почв и классы латеральных и радиальных геохимических барьеров, выявлялись путем многомерного регрессионного анализа в пакете S-Plus.

### Глава 3. Пространственная дифференциация почвенного покрова по содержанию тяжелых металлов и металлоидов

Особенности локального фона выявлены путем анализа геохимических данных для поверхностных горизонтов почв, сформированных на различных почвообразующих породах – четырех в Закаменске и пяти в Эрдэнэте. Все фоновые пробы имеют общую группу элементов, превышающих среднемировые значения: в районе ДВМК – W ( $EF_g = 2,9-20,2$ ), Mo (1,3–7,1), Bi (2,7–3,7), Sb (1,8–4,2), ГОКа «Эрдэнэт» – Mo (1,7–5,1), Sb (1,2–2,4) и Sr (1,8–2,3). Содержание всех остальных элементов незначительно отличается от эталонных ( $EF_g = 1-3,7$ ;  $DF_g = 1-2,6$ ).

Разработка W-Mo и Cu-Mo гидротермальных месторождений привела к вовлечению в миграционные потоки больших количеств ТММ и резкому увеличению в поверхностных горизонтах городских почв халькофильных элементов: в Закаменске –  $Bi^{9}W^{7,8}Cd^{4,6}Pb^{3,5}Mo^{3,4}Sb^{2,4}Zn^{1,7}Cu^{1,6}$ ; в Эрдэнэте –  $Mo^{4,2}Cu^{4,1}$  (верхний индекс – значение  $EF_i$ ). Для первого источником загрязнения является интенсивное физическое и химическое выветривание материала высохших хвостохранилищ ДВМК, а также повсеместное использование его отходов при строительстве зданий, детских площадок и дорог. Для второго – также рассеивающиеся в ландшафтах отходы ГОКа, рудовмещающие и вмещающие породы месторождения, обогащенные рудными элементами, выбросы ТЭЦ и дефляция складированного угля. В обоих городах наиболее техногенно-нарушенными являются поверхностные горизонты почв промышленной зоны, наименьшее воздействие испытывают почвы селитебной зоны с одноэтажной застройкой (рис. 3).

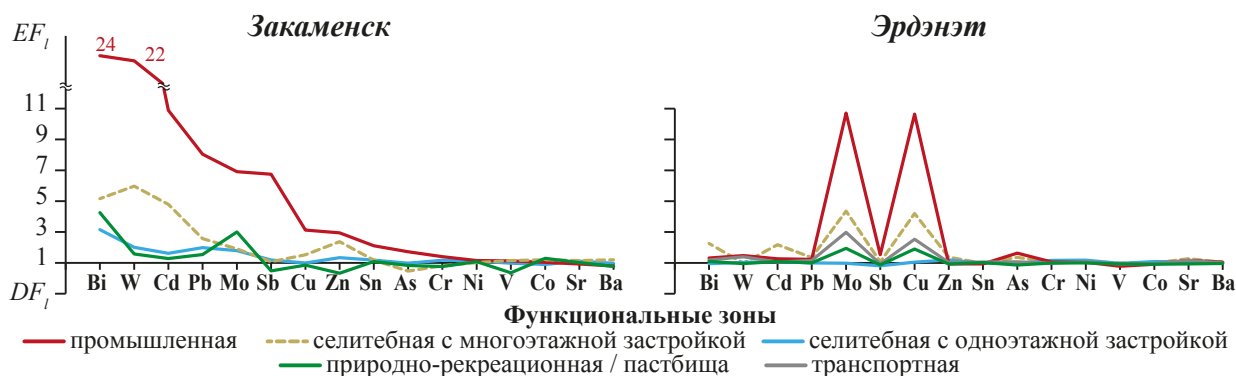


Рис. 3. Геохимические спектры поверхностных горизонтов почв горнопромышленных центров в разных функциональных зонах. ТММ ранжированы по убыванию  $EF_i$  в промышленной зоне Закаменска



В поверхностном слое почв обоих горнопромышленных центров выделяются ассоциации халькофильных элементов: в Закаменске – Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn и As–Sb–Pb–Mo, в Эрдэнэте – Cu–Sb–As–Mo–Bi–Cd, образующие высококонтрастные аномалии в отходах предприятий. В аварийном хвостохранилище Закаменска, подвергнутому в 2011 г. механической рекультивации, обнаружено наибольшее количество ТММ с максимальными концентрациями, приуроченными к вышедшему на дневную поверхность погребенному гумусовому горизонту, в который на протяжении более 60 лет происходило вымывание и последующее закрепление элементов на биогеохимическом барьере. Содержание Sb здесь превышает фон в 356 раз; Cd – 70; Mo, Bi, Cu, W – 55-42; Pb, As – 37-34; Zn и Sn – 12-6. В остальных – Барун-Нарынском, Зун-Нарынском и Джидинском хвостохранилищах содержание ТММ из двух полиэлементных ассоциаций также многократно (4-70 раз) превышает фоновые значения (рис. 4 А).

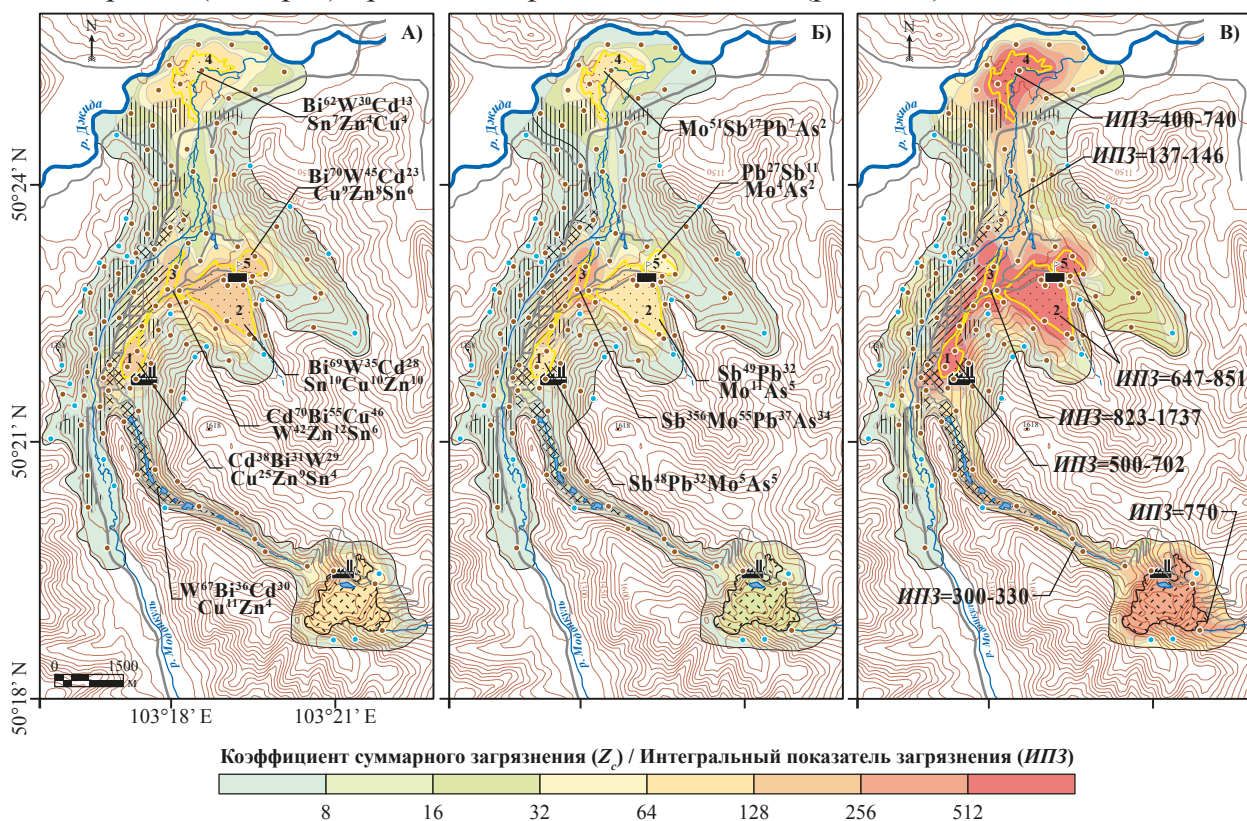


Рис. 4. Распределение  $Z_c$  первой (А) и второй (Б) полиэлементных парагенетических ассоциаций и ИПЗ (В) в поверхностном слое почв Закаменска. Верхний индекс – значения  $EF_i$  элементов

Ассоциации Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn и As–Sb–Pb–Mo образуют слабоконтрастную аномалию в поверхностных горизонтах почв долины р. Модонкуль, вытянутую с юга на север на 7,5 км и захватывающую восточную часть поймы р. Джиды (рис. 4 А, Б). Своим формированием она обязана плоскостному смыву и дальнейшему транспорту речным потоком тонких фракций материала Барун-Нарынского и аварийного хвостохранилищ. Вторая зона аккумуляции – техногенное Модонкульское месторождение, сложенное в основном мелкозернистыми песками, имеет в разрезе тонкую ритмичную слоистость

(Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002), отражающую периодические крупные разливы р. Модонкуль. Осаждение ТММ происходит на седиментационном геохимическом барьере, где река резко меняет направление течения с меридионального на субширотное. Поверхностные горизонты почв в этой части долины р. Модонкуль характеризуются превышением фоновых значений Bi, Mo, W в 30-62 раза, Sb, Cd, Pb, Sn – в 4-17 раз, Zn и Cu – в 4 раза.

В поверхностных горизонтах почв запруженной долины р. Инкур выявлена аномалия Zn-Cd-Cu-W-Bi-Sn, где их содержание в 4-67 раза превышает фоновые концентрации (рис. 4 А). Этот участок расположен в пределах Au-W россыпи, разрабатываемой с 1883 до начала 1900-х гг. В 1990-х гг. началась повторная отработка этого месторождения компанией ЗАО “Закаменск”, которая сопровождалась перепланировкой местности с проходкой тяжелых и легких горных выработок, дорог, устройством отвалов, накопительных прудов, отстойников, проводкой водоводов, пульпопроводов и др.

Полиэлементная ассоциация Cu-Sb-As-Mo-Bi-Cd в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» характеризуется двумя контрастными зонами аккумуляции (рис. 5), фиксируемыми в поверхностных горизонтах почв. Северная, с  $EF_i$  от 1,7 (Bi) до 56,8 (Mo), приурочена к хвостохранилищу, которое состоит из отработанной горной породы штокверкового Эрдэнэтского месторождения, обогащенной этими элементами (Гаврилова и др., 2010). Восточная находится на территории ГОКа и характеризуется превышением фонового содержания Cu, Mo, Sb, As, Bi, Cd (рис. 5 А). Ее формирование связано с осаждением из атмосферы частиц пыли, образующихся во время дробления при извлечении полезной компоненты (АОЗТ «Механобр Инжинринг», 2001) и транспортировки добываемой породы.

Рассматриваемая ассоциация элементов образует также слабоконтрастную аномалию в поверхностных горизонтах почв центральной части города с жилой застройкой, ковровым заводом и ТЭЦ. Источником ТММ в аномалии является пыль горно-обогачительного предприятия, переносимая на колесах и корпусе автотранспорта, выбросы ТЭЦ и автотранспорта, состоящие из выхлопных газов и твердых частиц, образующихся при истирании шин, износе тормозных колодок и механизмов, абразии дорожного покрытия и разметки.

В зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» выделена полиэлементная ассоциация Zn-Pb-Ba-Sn. Элементы накапливаются в почвах юрочной зоны и у северной границы ТЭЦ. Их источником являются используемые на ТЭЦ и в юртах бурые угли из разрезов Баганур и Шарынгол, которые характеризуются превышениями глобальных кларков для угля (Юдович, Кетрис, 2006) по As – в 17,1 раза, Sn – 9,9, Zn – 7,8, Pb – 6,1, Sb – 4,2, Cd – 3,2 и Bi – 2,3 раза. Эта аномалия протягивается до коврового завода, который использует красители, как правило, содержащие Zn и Pb (Сает и др., 1990).

Распределение V, Co, Cr, Ni в поверхностных горизонтах почв обоих центров



довольно однородно ( $C_v=8-35\%$ ), а значения локальных коэффициентов накопления  $EF_i < 3$ . Это обусловлено петрохимическими особенностями пород, преобладающих на первых этапах формирования геологических комплексов рассматриваемых территорий.

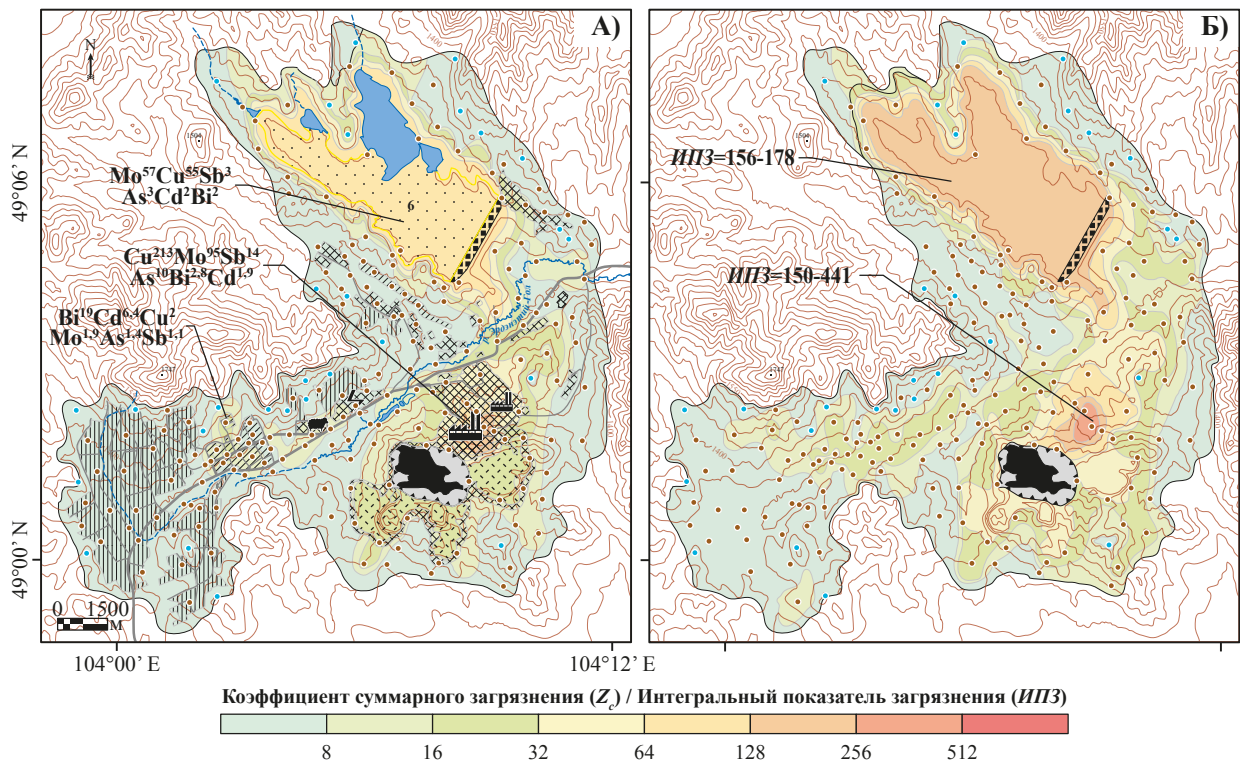


Рис. 5. Распределение суммарного показателя загрязнения  $Z_c$  первой (А) полиэлементной парагенетической ассоциации и  $IPI$  (Б) в поверхностном слое почв Эрдэнэта

Пространственные различия в уровнях содержания Cd, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Sb в поверхностных горизонтах почв и техногенных почвенных образованиях Закаменска и Эрдэнэта обусловлены в основном уровнем техногенной нагрузки, варьирующей в зонах различного функционального назначения, и в меньшей степени – природными особенностями. Дифференциация Co, V, Cr, Ni в почвах обоих горнопромышленных центров зависит от изменения содержания оксидов Fe, Al и Mn, а Sr – от реакции среды. Поведение Bi, Sn, W характеризуется индивидуальными особенностями в каждом из рассматриваемых городов, в пределах Закаменска оно в большей степени зависит от функционального назначения территории, а в Эрдэнэте – от количества оксидов Al и Fe в почвах.

#### Глава 4. Дифференциация тяжелых металлов и металлоидов в почвенных катенах

В автономных позициях природными типами почв вблизи Закаменска и Эрдэнэта являются горная дерново-таежная и горная каштановая, соответственно, на склонах и в их нижних частях – серогумусовая метаморфизованная и светло- или темно-каштановая, а в подчиненных – аллювиальная (темно-)гумусовая с признаками оглеения в

нижней части профиля. Почвы фоновых катен в районе ДВМК и ГОК «Эрдэнэт» имеют кислую, слабо-кислую ( $pH=4,9$ ) и слабощелочную, щелочную реакцию (7,2-9,2), соответственно; содержание гумуса 0,2-7% и 0,8-4,1; легкосуглинистого состава с долей ила 2-2,8% и 2,8-3,5. Из-за широкого распространения вулканических пород геохимическая специализация почв во всех родах элементарных ландшафтов в районе Закаменска имеет вид W-Mo-Cd-Bi-Sr ( $KK=1,5-9,2$ ), Эрдэнэта – V-Co-Sr-As (1,5-3).

Латеральная дифференциация ТММ в выявленных типах почв фоновых катен вблизи горнопромышленных центров обусловлена близостью залегания почвообразующих пород, наличием обломков в почвенном профиле и вариабельностью физико-химических свойств почв. На основе анализа различных классификаций распределения элементов и вещества в почвенных катенах [Геннадиев, Жидкин, 2012; Касимов, Самонова, 2004; Sommer, Schlichting, 1997] выделены следующие типы латерально-миграционной дифференциации ТММ: 1) вне-аккумулятивный – при отсутствии выраженных зон аккумуляции в пределах катены; 2) верхне- 3) срединно- и 4) нижне-аккумулятивные типы – при локализации зон аккумуляции в автономных, трансэлювиальных или трансаккумулятивных и супераккумулятивных ландшафтах соответственно. Верхне-аккумулятивный тип распределения свойственен Cu, As, Sb, Mo, Pb, V, Co, Ni, Ba, Cd, Sn вблизи Закаменска и V, Cr, Co, Ni вблизи Эрдэнэта; вне-аккумулятивный – Bi, Cr, W и Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Sn, W, Ba, Pb, соответственно; срединно-аккумулятивный – Sr, Zn вблизи Закаменска, нижне-аккумулятивный – As, Sb, Bi вблизи Эрдэнэта.

В обоих горнопромышленных центрах встречаются такие же типы почв, как и на фоновых участках. В верхней части профиля единично встречается строительный и бытовой мусор. Из-за техногенного воздействия произошло изменение физико-химических свойств: подкисление реакции среды, увеличение в почвах Закаменска количества физического песка, а в Эрдэнэте – илистой фракции. В пределах хвостохранилищ и прилегающих территорий формируются арти- и токсииндустраты, в профиле которых присутствуют искусственные насыпные горизонты из нетоксичного и токсичного материалов.

Наибольшее техногенное изменение претерпели почвы подчиненных ландшафтов в обоих горнопромышленных центрах (рис. 6): в Закаменске относительно фоновых сильно увеличилась концентрация халькофильных элементов  $W^{143}M^{87}Bi^{80}Sb^{32}Pb^{22}Cd^{19}Cu^7Zn^{6,5}$  и доля физического песка (до 95%); в Эрдэнэте –  $Mo^{13}Cu^7$  и ила (до 5-6%). Причиной является поступление ТММ в результате разрушения хвостохранилищ и петрохимические особенности почвообразующих пород.

Почвы автономных ландшафтов, расположенных на водоразделах с глубоким залеганием грунтовых вод и поступлением вещества только из атмосферы, наименее подвержены техногенному воздействию. В зоне влияния ДВМК выявлено небольшое накопление Sn, W, Bi, Zn ( $EF_1=1,6-3,9$ ) и рассеяние As, Ni и Sr ( $DF_1=1,7-2,1$ ), а ГОК

«Эрдэнэт» – Cu (1,5), Mo (1,6) и Cr (2,8), Ni (2,8), соответственно. Близкими геохимическими характеристиками, однако, с чуть более контрастными значениями коэффициентов концентрации и более широким перечнем элементов, обладают почвы трансэлювиальных позиций, куда вещество поступает не только из атмосферы, но и с боковым твердым и жидким стоком.

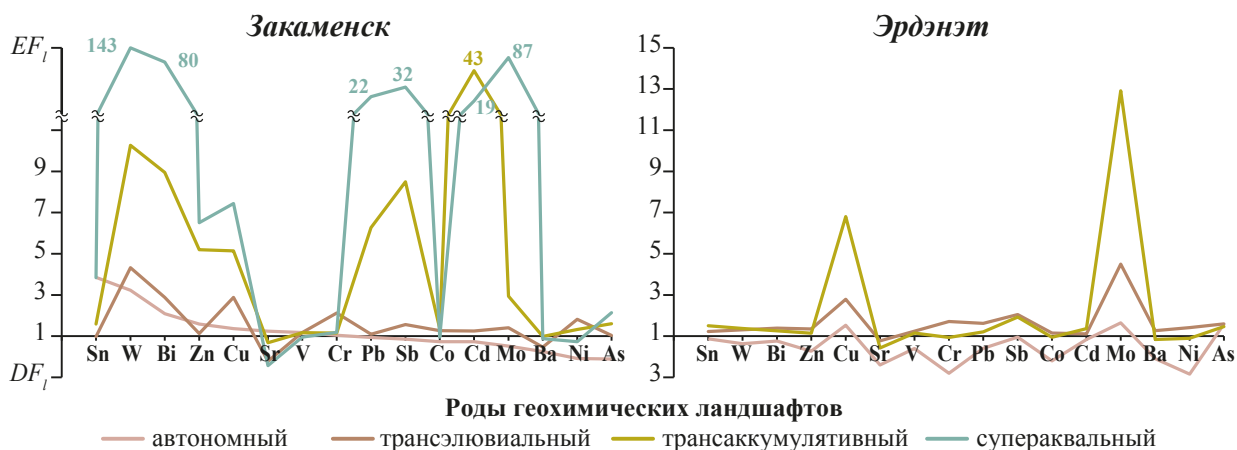


Рис. 6. Геохимические спектры городских почв в разных геохимических ландшафтах.

ТММ ранжированы по убыванию в почвах автономных ландшафтов Закаменска

В результате техногенного воздействия контрастность латерального распределения ТММ в почвах Закаменска возрастает в десятки раз ( $L_i=6-47$ ), а Эрдэнэта – в единицы (2-8). В обоих горнопромышленных центрах произошла смена верхне- и вне-аккумулятивного типов латерального распределения халькофильных элементов Cu, Sb, Mo, Pb, Bi, W в фоновых условиях на ниже-аккумулятивный в городских катенах (рис. 7). Cr, Ni, Sr имеют срединно-аккумулятивный тип дифференциации. Распределение остальных элементов зависит от индивидуальных особенностей центров: в зоне ДВМК V, Co, Sn имеют верхне-аккумулятивный тип, As, Zn, Cd – вне-аккумулятивный, Ba – срединно-аккумулятивный; в районе ГОК «Эрдэнэт» V – вне-аккумулятивный, Zn, As, Cd, Sn, Ba – ниже-аккумулятивный, Co – срединно-аккумулятивный.

Аккумуляция ТММ обусловлена их накоплением на латеральных геохимических барьерах. Техногенное воздействие привело к формированию природно-техногенного сорбционно-седиментационного латерального барьера, по разному проявляющегося в горнопромышленных центрах. В зоне влияния ДВМК это проявляется в увеличении количества физического песка, поступающего в ландшафты за счет водной эрозии хвостохранилищ, а в районе ГОК «Эрдэнэт» – ила, накапливающегося в результате золотого переноса. Поступление в почвы обогащенного ТММ материала приводит к увеличению содержания рудных элементов (Mo, W, Cu) и их спутников (Pb, Bi, As, Sr, Cr, Ni). В Закаменске осушенные хвостохранилища подвержены активной дефляции, плоскостному смыву и химическому сернокислому выветриванию, что приводит к увеличению скорости окисления сульфидов, растворению продуктов выветривания и, как следствие, увеличению миграционной способности ТММ. Элементы в основном осаж-

даются на хемосорбционном (V, Co, Ba), глеевом (Mo, Cd, Sb) и органоминеральном (Sn) барьерах. В Эрдэнэте выявлены хемосорбционный (V, As, Cr, Ni), щелочной (Sr, W) и кислый (Sn) барьеры. Распределение Zn, Cd, Pb, Bi, Sb зависит от литогеохимической неоднородности почвообразующих пород.

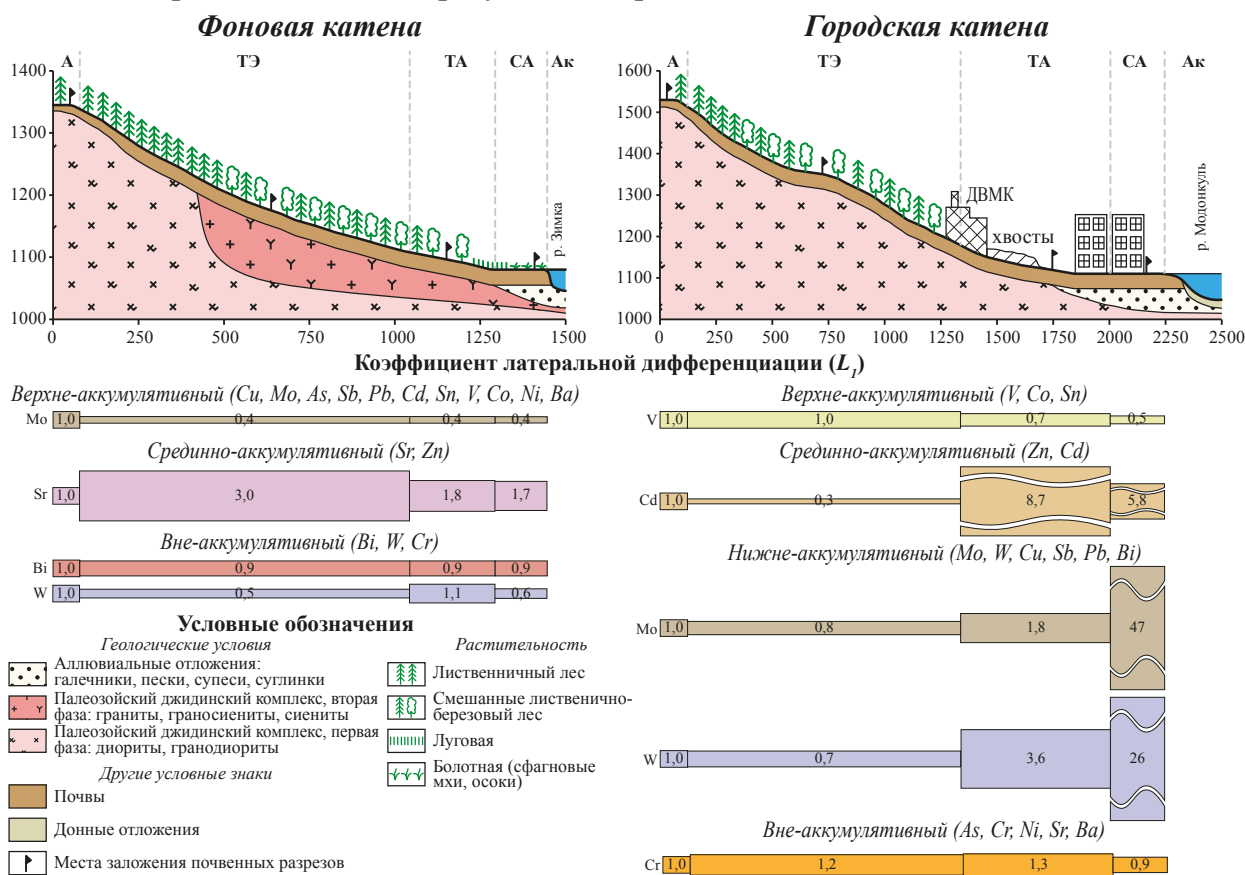


Рис. 7. Фоновая и городская катены вблизи Закаменска. Элементарные ландшафты: А – автономный; ТЭ – трансэлювиальный; ТА – трансаккумулятивный; СА – супераккумулятивный; Ак – аккумулятивный.

Анализ пространственного распределения латеральных геохимических барьеров в зоне влияния предприятий выявил наибольшее распространение в обоих горнопромышленных центрах хемосорбционных и сорбционно-седиментационных в сочетании с кислыми и щелочными барьерами, где накапливаются Mo, W, Bi, Pb, Co, Sb, Cr, Ba, Cu, Sr, Ni в Закаменске и Cu, Mo, Cd, Sn, Zn, V, Ba в Эрдэнэте. В зоне влияния ДВМК, на склонах долины р. Модонкуль в природно-рекреационной зоне и вдоль русла в виде узкой полосы локально формируются органо-минеральный и глеевый барьеры, соответственно.

Внутрипрофильное распределение ТММ в наиболее распространенных типах техногенно измененных почв, оценивалось в зависимости от показателя аккумулятивности (Водяницкий, 1991). По сравнению с фоновыми условиями оно принципиально не меняется. Большая часть элементов (Mo, W, Zn, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi, Ba) в Закаменске имеет аккумулятивный тип радиальной дифференциации, а в Эрдэнэте Mo, Bi, Sb – ак-



кумулятивный, Zn и Sn – элювиальный, распределение Ni, V, Cd, Pb, Ba не отличается постоянством.

Радиальная дифференциация валового содержания ТММ в почвах горнопромышленных центров имеет много общих черт. Наибольшее количество элементов осаждается на хемосорбционном педогеохимическом барьере: в Закаменске – V, Co, Ba, Sr, Bi, Mo, Sn, Zn, Cd, в Эрдэнэте – V, Cr, Co, Ni, Zn, Sr, Sn. В результате разработки сульфидного W-Мо месторождения, формирования хвостохранилищ, являющихся неотъемлемой частью горнорудных районов и производственного цикла, в зоне влияния ДВМК, в отличие от Эрдэнэта, формируются комплексные радиальные педогеохимические барьеры.

### Глава 5. Микроэлементный состав древесных растений

По сравнению с общемировыми кларками (Добровольский, 2003; Markert, 1993) в древесных породах вблизи горнопромышленных центров на фоне повышены концентрации не рудных, а элементов-спутников, характерных для Джидинского и Эрдэнэ-тского комплексов почвообразующих пород: в Закаменске – Ba, Mn, Cd, Zn, Sr, Pb; в Эрдэнэте – Sr, Zn, Ba. Все элементы независимо от видовой специализации растений имеют акропетальный характер распределения, их содержание в золе многолетних органов значительно превышает концентрации в золе ассимилирующих ( $Ak_{бер., листв.} = 0,02-0,89$ ). Базипетальное распределение свойственно только для Mn в лиственнице ( $Ak_{листв.} = 1,6$ ) и Sr, Ba и Ni в березе ( $Ak_{бер.} = 1,1-1,7$ ). В зоне влияния ДВМК изменилась онтогенетическая специализация древесных растений:  $Ak$  увеличился по сравнению с фоном в 1,5-52 раза, что привело к смене для Cr и Ni базипетального в фоновых условиях на акропетальный тип распределения. Это является показателем того, что растения испытывают высокий уровень экологического стресса.

На территории Закаменска органы лиственницы сибирской и березы плосколистной обогащены Cr, W ( $EF_i = 86-34$ ), V, Pb, Bi, Sb, Mo ( $EF_i = 13-8$ ), Ni, Cd, Sn, As, Sr ( $EF_i = 6-2$ ) по сравнению с местным фоном, что вызвано неконтролируемым размещением хвостов предприятия, выбросами ТЭЦ и завода по переплавке металлов. В Эрдэнэте воздействие минимально и проявляется в превышении содержания микроэлементов относительно фона лишь 1,5-6,5 раз, основной вклад вносят V, As, Pb, Bi, Co, Sb, Cd. В зоне влияния ДВМК степень трансформации микроэлементного состава лиственных и хвойных пород снижается одинаковым образом в ряду: промышленная зона > селитебная > природно-рекреационная. В районе ГОК «Эрдэнэт» – различно – для лиственных: многоэтажная жилая > промышленная > одноэтажная жилая, а для хвойных: промышленная > многоэтажная жилая > одноэтажная жилая зона.

Ассимилирующие органы хвойных и лиственных деревьев имеют одинаковый перечень приоритетных загрязнителей, что свидетельствует о слабой видовой избирательности поглощения. Они более интенсивно накапливают элементы относительно

фона по сравнению с многолетними органами. Это объясняется тем, что ассимилирующие органы растений в большей степени нуждаются в притоке минерального питания и водных растворов из почвы, здесь происходит большее накопление как питательных, так и токсичных элементов. Важным отличием хвои лиственницы сибирской в обоих горнопромышленных центрах является более высокие значения  $EF_p$ , что вызвано наличием на ее поверхности воскового слоя, который прочно связывает ТММ, а также методикой пробоподготовки (Терехина, 2010).

В горнопромышленных центрах выявлены значительные изменения в биопоглощении ТММ, вызванные техногенным воздействием. Ассимилирующие и многолетние органы хвойных и лиственных пород во всех функциональных зонах характеризуются существенным накоплением катионогенных элементов – Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, а также специфичных для рудных проявлений анионов W и Mo (рис. 8).

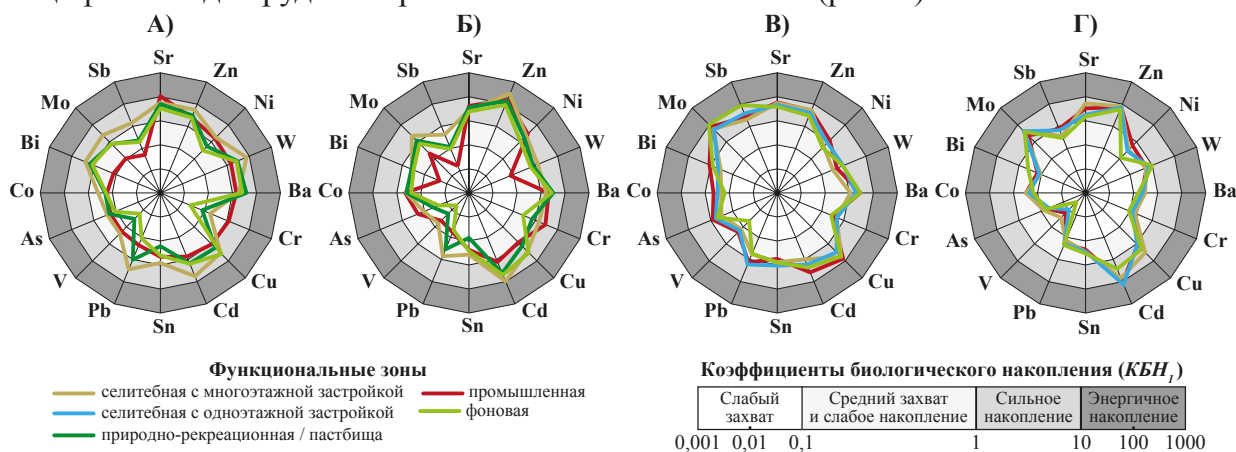


Рис. 8. Ряды распределения  $КБН_1$  для хвои лиственницы сибирской (А), листьев березы плосколистной (Б) в Закаменске, хвои лиственницы сибирской (В) и листьев тополя (Г) в Эрдэнэте

Для всех микроэлементов величина коэффициентов биологического накопления больше 1, что свидетельствует о формировании фитобарьера (Алексеевко, 2006). Видовые различия в накоплении элементов весьма значительны: лиственные растения (береза и тополь), в отличие от хвойных, более селективны в отношении Cd и Zn. Различия между максимальными и минимальными значениями  $КБН_1$  и  $КБН_2$  для Cd составляют 106 и 167 раз, для Zn – 111 и 77, соответственно.

## Глава 6. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова и древесной растительности горнопромышленных центров

Наибольшую техногенную геохимическую трансформацию испытывают поверхностные слои почв в промышленной зоне, особенно на территории предприятий и хвостохранилищ. В Закаменске, в результате отсутствия рекультивационных работ на хвостохранилищах и использовании их материала при создании и поддержании инфраструктуры города, площадь с максимальными значениями  $Z_c > 128$  составляет 22%



и захватывает значительную часть многоэтажной жилой застройки, а вместе с умеренным и высоким уровнем ( $32 < Z_c < 128$ ) – более 50% (рис. 9 А). При таком суммарном содержании ТММ увеличивается заболеваемость населения болезнями органов дыхания и костно-мышечной системы (МУ 2.1.7.730-99). Наиболее контрастные аномалии приурочены к хвостохранилищам: аварийному ( $Z_c=485-721$ ), Барун-Нарынскому (316), Зун-Нарынскому (292), Джидинскому (265).

В Эрдэнэнте к зоне с наибольшей степенью техногенной нарушенности относится менее 1% территории (рис. 9 В), которая находится в пределах градообразующего предприятия ( $Z_c=1559$ ). Так как размещение отходов в хвостохранилище тщательно контролируется, значения  $Z_c$  здесь не достигают критического уровня ( $Z_c=109-118$ ). В целом город характеризуется как чистый ( $Z_c < 16$ ).

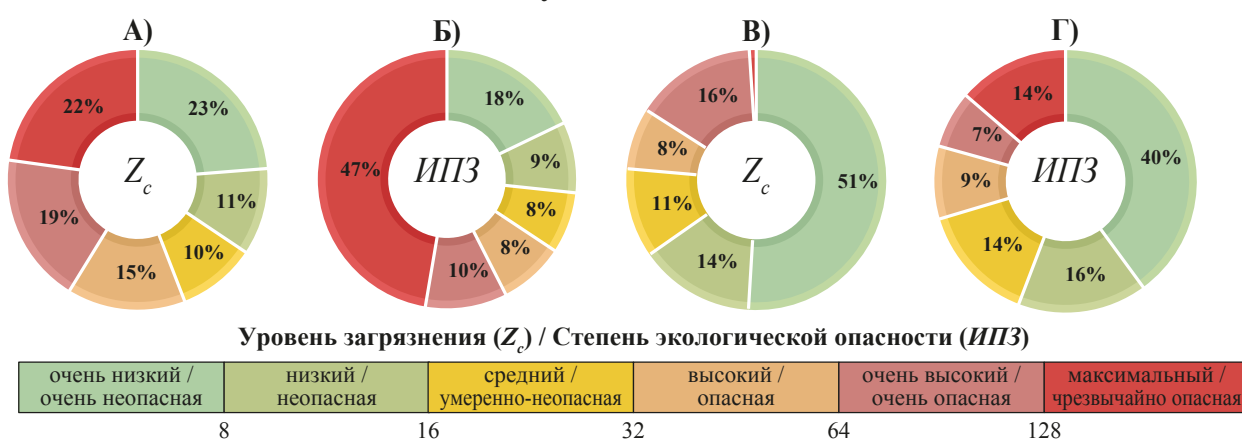


Рис. 9. Распределение площадей почв Закаменска (А, Б) и Эрдэнэнта (В, Г) по градациям  $Z_c$  и  $IIPZ$

Региональные и международные санитарно-гигиенические нормативы нуждаются в доработке: в РФ отсутствует ПДК или ОДК для наиболее экологически опасных в зоне влияния ДВМК W и Mo, в международных – W. Наибольшую опасность в Закаменске представляют Pb, Sb, Cd и As, в промышленной зоне их  $K_o$  достигают 7,8, 3,6, 2,1 и 1,7, соответственно, а в селитебной многоэтажной – 1,8, 0,5, 0,8 и 1. В Эрдэнэте ситуация совершенно иная: концентрации Zn, Cr, Sr, Pb, Co, Ni, Cd, Sn не превышают региональных нормативов ( $K_o=7-77\%$  от ПДК). Максимальные  $K_o$  для рудных Cu и Mo составляют 8,7 и 5,7, соответственно, и 3,8 для As в промышленной зоне. Относительно международных нормативов в зоне влияния ДВМК превышен допустимый уровень для Cd, Cu, Mo, Pb, а ГОК «Эрдэнэт» – Cu и Mo. На промплощадке ГОК «Эрдэнэт» выявлены превышения Cu в 2,4 раза уровня, требующего экстренного вмешательства для снижения негативного воздействия на почвенный покров.

Экологическая оценка полиэлементного загрязнения проводилась с учетом токсичности элементов с помощью  $IIPZ$ . В Закаменске медианное значение  $IIPZ$  составляет 102 (очень опасная экологическая ситуация), а в Эрдэнэте – 14,6 (неопасная экологическая ситуация). Наибольшие уровни загрязнения в зоне влияния ДВМК характерны

для центров геохимических аномалий (рис. 4 В): аварийное хвостохранилище; Барун-Нарынское и Зун-Нарынское; Модонкульское техногенное месторождение; территория предприятия и Джидинское хвостохранилище; долина р. Инкур и р. Модонкуль; подножие отвалов вскрышных пород. В Эрдэнэте (рис. 4 Б) максимальные средние и точечные значения приурочены к территории ГОК «Эрдэнэт», предприятию «Эрдмин» и хвостохранилищу. В Закаменске в зону с чрезвычайно опасной экологической ситуацией ( $ИПЗ > 128$ ) попадает около 50% территории, в Эрдэнэте – 14% (рис. 9 Б, Г).

Оценка техногенной биогеохимической трансформации показала наличие высокого и чрезвычайно высокого полиэлементного загрязнения древесной растительности в Закаменске ( $Z_v = 46-95$ ) и его отсутствие в Эрдэнэте. Для первого установлена ассоциация элементов-загрязнителей W, Pb, Bi, Cd, Mo для всех органов хвойных и лиственных растений. В результате активных процессов физического и химического выветривания хвостохранилищ и Модонкульского месторождения сформировались две аномалии: на севере Закаменска, фиксируемая в хвое и листьях, и в центре – вокруг промплощадки, фиксируемая в ассимилирующих и многолетних органах. В Эрдэнэте уровень техногенной трансформации микроэлементного состава древесной растительности средний, с одной локальной аномалией, фиксируемой только в хвое лиственницы сибирской в непосредственной близости от ТЭЦ.

В городских растениях существенно нарушено физиологическое соотношение  $Fe/Mn$ . Его резкое увеличение до 5 и более в промышленной и селитебной зонах по сравнению с 0,02-3,4 в фоновых условиях свидетельствует о нарушении процессов фотосинтеза. Наибольший техногенный пресс испытывают хвойные растения в промышленной зоне Закаменска, где отношение  $Pb/Mn$  более чем в 10 раз превышает уровень для незагрязненной растительности суши (0,006). Дисбаланс в обеспечении процессов синтеза ферментов из-за избытка Zn и дефицита Cu испытывают органы лиственницы сибирской и березы плосколистной во всех функциональных зонах исследуемых горнопромышленных центров. Геохимическая трансформация органов лиственных пород в целом незначительна, за исключением локальных аномалий в Закаменске вдоль дорог, где  $Pb/Mn$  в 5 раз превышают оптимум, и в Эрдэнэте – поблизости от ТЭЦ – в 3 раза.

## ВЫВОДЫ

1. Поверхностные горизонты фоновых почв вблизи Закаменска и Эрдэнэта имеют W-Mo-Bi-Sb и Mo-Sb-Sr-As геохимическую специализацию, соответственно. Концентрации остальных ТММ незначительно отличаются от среднемировых значений ( $EF_g = 1-3,7$ ;  $DF_g = 1-2,6$ ). Наибольшие средние концентрации Zn, Co, Cu, Mo, Ba и W установлены в почвах, сформированных на гранодиоритах, диоритах и плагиогранитах пермского возраста. В Эрдэнэте, в отличие от Закаменска, проявляются и петрохимические особенности морфоструктур – приуроченность к As геохимической провинции.

2. При техногенной трансформации поверхностных горизонтов почв в горнопромышленных центрах увеличивается концентрация ТММ: в Закаменске – Bi, W, Cd, Pb, Mo, Sb, Zn, Cu; в Эрдэнэте – Mo и Cu. Состав и пространственная дифференциация парагенетических ассоциаций приоритетных элементов-загрязнителей напрямую зависит от уровня антропогенной нагрузки (Cd, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Sb) и физико-химических свойств почв (Co, V, Cr, Ni, Sr). Наибольшую техногенную нагрузку испытывают поверхностные горизонты почв в промышленных зонах (в районе ДВМК накапливаются Bi, W, Cd, Pb, Mo, Sb, Cu, Zn, Sn, As, в районе ГОК «Эрдэнэт» – Mo, Cu, As, Sb, W), а наименьшее – в природно-рекреационной Закаменска (Bi, Mo, Pb) и пастбищ Эрдэнэта (Mo, Cu, As, Sb, W). Ассоциации халькофильных элементов в Закаменске – Zn-Cd-Cu-W-Bi-Sn и As-Sb-Pb-Mo и в Эрдэнэте – Cu-Sb-As-Mo-Bi-Cd – образуют высококонтрастные аномалии в хвостохранилищах, что обусловлено петрохимическими особенностями рудных тел и вмещающих их пород. Дифференциация Zn-Pb-Ba-Sn в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» проявляется в формировании аномалий в юрточной зоне и у северной границы ТЭЦ, что связано с использованием угля из разрезов Баганур и Шарынгол с повышенными относительно глобальных кларков концентрациями As, Sn, Zn, Pb, Sb, Cd, Bi. Пространственное распределение V, Co, Cr, Ni в горнопромышленных центрах однородное.

3. При техногенном воздействии контрастность латеральной дифференциации ТММ в почвах катен увеличивается со сменой гранулометрического состава почв, для многих ТММ происходит смена типа катенарного распределения. В аллювиальных, серогумусовых метаморфических и искусственно сформированных (арти- и токсиндустратах) почвах подчиненных ландшафтов Закаменска по сравнению с фоновыми увеличивается количество физического песка (до 95%) и концентрация халькофильных элементов W, Mo, Bi, Sb, Cd, Cu, Zn, а в темно-каштановых Эрдэнэта – содержание ила (до 6,9%) и рудных Cu, Mo. В зоне влияния ДВМК, в отличие от Эрдэнэта, резко усиливается контрастность латерального распределения ТММ – в фоновой катене геохимические различия между ландшафтами, рассчитанные по средневзвешенным значениям, не превышали 2-3 раз, а в горнопромышленном центре они возросли на порядок.

4. Разрушение хвостохранилищ современными экзогенными процессами привело к формированию природно-техногенного сорбционно-седиментационного латерального барьера. В зоне влияния ДВМК это проявляется в увеличении количества физического песка, а в районе ГОК «Эрдэнэт» – ила, обогащенных ТММ, и увеличению содержания рудных элементов (Mo, W, Cu) и их спутников (Pb, Bi, As, Sr, Cr, Ni). В Закаменске элементы также осаждаются на хемосорбционном (V, Co, Ba), глеевом (Mo, Cd, Sb) и органоминеральном (Sn) барьерах. В Эрдэнэте выявлены хемосорбционный (V, As, Cr, Ni), щелочной (Sr, W) и кислый (Sn) барьеры. Распределение Zn, Cd, Pb, Bi, Sb зависит от литогеохимической неоднородности почвообразующих пород. Наиболь-

шее распространение в обоих горнопромышленных центрах имеют хемосорбционный и сорбционно-седиментационный в сочетании с кислыми и щелочными латеральными геохимическими барьерами.

5. Повышенное содержание в почвах и атмосфере анионогенных элементов W и Mo в зоне влияния горно-обогатительных комбинатов не привело к смене биогеохимической специализации древесных растений – катионогенная активность доминирует над анионогенной: в группу сильного и очень сильного захвата микроэлементов из почвенной толщи входят Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb, Bi; в группу слабого – анионы V и Cr. Наличие воскового слоя кутикулы, который прочно связывает на поверхности иголок лиственницы сибирской поступающие ТММ, обуславливает их большее накопление, чем у лиственных пород, однако перечень приоритетных загрязнителей близок, что свидетельствует о слабой видовой избирательности фоллиарного поглощения древесными растениями. Почти все элементы имеют акропетальный характер распределения – их содержание в золе многолетних органов значительно превышает концентрации в золе ассимилирующих. Влияние ДВМК проявляется в увеличении в десятки раз коэффициента акропетальности и смене характера распределения Cr и Ni на базипетальный.

6. Диагностика экологического состояния поверхностных горизонтов почв и органов древесных растений в горнопромышленных центрах показала наличие чрезвычайно высокого полиэлементного загрязнения в Закаменске и его слабое проявление в Эрдэнэте. В первом около половины территории характеризуется чрезвычайно опасным уровнем загрязнения почв и формированием высококонтрастных аномалий в ассимилирующих и многолетних органах растений с повышенными концентрациями W, Pb, Bi, Cd, Mo; во втором выявлена локальная аномалия в почвах на промплощадке ГОКа и в растениях вблизи ТЭЦ. Наибольшую опасность в поверхностных горизонтах почв обоих центров относительно международных нормативов представляют Cu, Mo, а в зоне влияния ДВМК – еще также Cd и Pb. Оценка эколого-геохимического состояния почвенного покрова показала необходимость проведения рекультивации существующих и формирующихся хвостохранилищ и техногенных месторождений путем их изоляции вяжущими веществами или фиторемедиации.

7. При ландшафтно- и эколого-геохимических исследованиях горнопромышленных центров, находящихся в условиях литолого-геохимической неоднородности с высокой контрастностью содержания в фоновых почвах рудных элементов, спутников и примесей, целесообразно использовать комплекс геохимических показателей, характеризующих:

– геохимическую специализацию поверхностных горизонтов почв и органов древесных растений с помощью глобальных коэффициентов концентрации ( $EF_g$ ) и рассеяния ( $DF_g$ ) для фоновых территорий и локальных коэффициентов ( $EF_l / DF_l$ ) – для горнопромышленных;

- степень техногенной геохимической трансформации, определяемую по значениям суммарного показателя загрязнения  $Z_c$ ;
- уровень загрязнения ТММ с учетом токсичности элементов, суммируемый в интегральном показателе экологической опасности загрязнения  $ИПЗ$ ;
- нарушение микроэлементного состава органов древесной растительности, отражаемое коэффициентом биогеохимической трансформации  $Z_v$ .

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. **Тимофеев И.В.**, Кошелева Н.Е., Бажа С.Н., Энх-Амгалан С. Геохимическая трансформация почвенного покрова в районе добычи медно-молибденовых руд (г. Эрдэнэт, Монголия) // Инженерные изыскания. 2014. №12. С. 26-35.
2. **Тимофеев И.В.**, Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия почвенного покрова горнопромышленных ландшафтов на юго-западе Забайкалья (город Закаменск) // География и природные ресурсы. 2016. №3. С. 49-61.
3. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., **Тимофеев И.В.** Геохимия поверхностных горизонтов почв в горнопромышленных ландшафтах (г. Закаменск, Забайкалье) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. №4. С. 316-333.

### *Статьи в журналах из перечня Web of Science / Scopus:*

4. **Timofeev I.V.**, Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Gunin P.D., Enkh-Amgалан S. Geochemical transformation of soil cover in copper–molybdenum mining areas (Erdenet, Mongolia) // Journal of Soils and Sediments. 2015. Vol. 16. Is. 4. P. 1225-1237. doi: 10.1007/s11368-015-1126-2
5. **Timofeev I.V.**, Kosheleva N.E. Geochemical disturbance of soil cover in the nonferrous mining centers of the Selenga River basin // Environmental Geochemistry and Health. 2016. P. 1-17. doi: 10.1007/s10653-016-9850-0
6. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., **Timofeev I.V.** Ecological and Geochemical Assessment of Woody Vegetation in Tungsten-Molybdenum Mining Area (Buryat Republic, Russia) // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. Vol. 41. Is. 1. P. 1-11. doi: 10.1088/1755-1315/41/1/012026
7. **Timofeev I.V.**, Ksaimov N.S., Kosheleva N.E. Soil cover geochemistry of mining landscapes in the South-East of Transbaikalia (City of Zakamensk) // Geography and Natural Resources. 2016. Vol. 37. Is. 3. P. 200-211. doi: 10.1134/S1875372816030033
8. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Gunin P.D., Korlyakov I.D., Sorokina O.I., **Timofeev I.V.** State of the environment of urban and mining areas in the Selenga Transboundary River Basin (Mongolia Russia) // Environmental Earth Sciences. 2016. Vol. 75. Is. 1283. P. 1-20. doi: 10.1007/s12665-016-6088-1

### *Главы в монографиях:*

9. Kosheleva N.E., **Timofeev I.V.**, Kasimov N.S., Kusselyova T.M., Alekseenko A.V., Sorokina O.I. Trace Element Composition of Poplar in Mongolian Cities // Biogenic-Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems / Eds. O.V. Frank-Kamenetskaya, E.G. Panova, D. Yu. Vlasov. Springer International Publishing AG Switzerland. 2016. P. 165-178. doi: 10.1007/978-3-319-24987-2\_14



*Статьи в прочих изданиях:*

10. **Тимофеев И.В.** Современное эколого-геохимическое состояние почвенного покрова г. Эрдэнэт (Монголия) // Экологические проблемы антропогенной трансформации городской среды: сб. мат-лов научно-практ. конф. Пермь: Пермский гос. нац. исследовательский университет. 2013. С. 164-169.

11. **Тимофеев И.В.** Техногенные аномалии тяжелых металлов и металлоидов в почвенном покрове г. Закаменска (Республика Бурятия) // Современные проблемы географии и геологии: Мат-лы III Междунар. научно-практ. конф. Томск: Томский государственный университет. 2014. С. 378-385.

12. **Тимофеев И.В.**, Кошелева Н.Е. Современное эколого-геохимическое состояние почвенного покрова в зоне влияния Джидинского вольфрамово-молибденового ГОКа // Окружающая среда и устойчивое развитие Монгольского плато и сопредельных территорий: мат-лы IX Междунар. конф. Улан-Удэ: Бурятский гос. университет. 2013. Т. 1. С. 246-251.

13. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., **Тимофеев И.В.**, Алексеенко А.В., Энх-Амгалан С. Экологические последствия добычи цветных металлов и бурого угля в бассейне р. Селенги // ecosystems of Central Asia under current conditions of socio-economic development: Proc. of the international conference. Ulaanbaatar. 2015. Vol. 2. P. 321-327

14. Kasimov N.S., Dorjgotov D., Gunin P.D., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Garmaev E.Zh., Kosheleva N.E., **Timofeev I.V.**, Shinkareva G.L. Environmental Geochemical and hydrological analysis of the Selenga river basin // Ecosystems of Central Asia under current conditions of socio-economic development: Proc. of the international conference. Ulaanbaatar. 2015. Vol. 1. P. 35-37

15. **Timofeev I.V.** Geochemical Transformation of Soils Caused by Non-Ferric Ore Mining in the Selenga River Basin (Case Study of Zakamensk) // Water and Environment in the Selenga Baikal Basin: International Research Cooperation for an Ecoregion of Global Relevance / Eds. D. Karthe, S. Chalov, N. Kasimov, M.Kappas. Stuttgart: Ibidem-Verlag. 2015. P. 137-151

16. Kosheleva N., Kasimov N., Gunin P., Bazha S., Enkh-Amgалан S., Sorokina O., **Timofeev I.**, Alekseenko A., Kisselyova T. Hotspot Pollution Assessment: Cities of the Selenga River Basin // Water and Environment in the Selenga Baikal Basin: International Research Cooperation for an Ecoregion of Global Relevance / Eds. D. Karthe, S. Chalov, N. Kasimov, M.Kappas. Stuttgart: Ibidem-Verlag. 2015. P. 119-136.

17. Хайбрахманов Т.С., **Тимофеев И.В.**, Кошелева Н.Е. Опыт построения карты родов элементарных ландшафтов на основе ЦМР для территории г. Закаменска (Бурятия) // Геоинформационное картографирование в регионах России: мат-лы VII Всеросс. научно-практ. конф. Воронеж: Научная книга. 2015. С. 148-152.

18. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., **Тимофеев И.В.**, Алексеенко А.В., Энх-Амгалан С. Экологические последствия добычи цветных металлов и бурого угля в бассейне р. Селенги // Ecosystems of Central Asia under current conditions of socio-economic development: Proceedings of the international conference. Улан-Батор. 2015. Vol. 2. С. 321-327.

19. **Тимофеев И.В.**, Кошелева Н.Е. Оценка эколого-геохимического состояния древесных растений в горнопромышленных ландшафтах (г. Закаменск, Республика Бурятия) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. Сборник научных статей по материалам XV международной научно-практической конференции. Барнаул: Изд-во АлтГу. 2016. С. 463-472.

20. **Тимофеев И.В.** Латеральная дифференциация тяжелых металлов и металлоидов в горнопромышленных ландшафтах бассейна р. Селенги // Геохимия ландшафтов (к 100-летию А.И. Перельмана). Сборник научных статей по материалам всероссийской научной конференции. Москва. 2016. С. 581-585