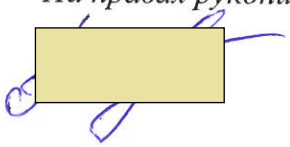
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГЕОХИМИИ ЛАНДШАФТОВ И ГЕОГРАФИИ ПОЧВ

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель
д.г.н., в.н.с. Н.Е. Кошелева

Москва-2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение **4**

Глава 1. Объекты исследования **13**

1.1. Физико-географические условия района Закаменска 13

1.1.1. Географическое положение и рельеф 13

1.1.2. Геологические условия 14

1.1.3. Климатические условия 16

1.1.4. Почвенный покров 18

1.1.5. Растительный покров 19

1.1.6. Поверхностные воды 21

1.2. Техногенное воздействие в Закаменске 24

1.2.1. Характеристика месторождений 24

1.2.2. Джидинский вольфрамо-молибденовый комбинат 27

1.2.3. Другие промышленные предприятия города 28

1.3. Физико-географические условия Эрдэнэта 30

1.3.1. Географическое положение и рельеф 30

1.3.2. Геологические условия 30

1.3.3. Климатические условия 33

1.3.4. Почвенный покров 35

1.3.5. Растительный покров 36

1.3.6. Поверхностные воды 37

1.4. Техногенное воздействие в Эрдэнэте 39

1.4.1. Характеристика месторождения 39

1.4.2. Горно-обогатительный комбинат «Эрдэнэт» 40

1.4.3. Другие промышленные предприятия города 42

Глава 2. Методы и материалы **43**

2.1. Полевые работы и полученные данные 43

2.2. Лабораторные работы 46

2.3. Обработка данных 48

2.4. Визуализация данных 53

Глава 3. Пространственная дифференциация почвенного покрова по содержанию тяжелых металлов и металлоидов 59

3.1. Геохимическая специализация фоновых почв 59

3.2. Геохимическая специализация почв горнопромышленных центров 62

3.3. Парагенетические ассоциации тяжелых металлов и металлоидов в почвах горнопромышленных центров 65

3.4. Пространственная структура загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами почвенного покрова 68

3.5. Факторы дифференциации почв горнопромышленных центров по содержанию тяжелых металлов и металлоидов 73

Выводы 79

Глава 4. Дифференциация тяжелых металлов и металлоидов в почвенных катенах 81

4.1. Геохимические особенности почв фоновых катен 81

4.2. Геохимическая специализация почв катен горнопромышленных центров 84

4.3. Латеральное распределение тяжелых металлов и металлоидов в почвах катен 87

4.4. Диагностика латеральных геохимических барьеров 92

4.5. Радиальное распределение тяжелых металлов и металлоидов в почвах 100

4.6. Диагностика радиальных геохимических барьеров 101

Выводы 106

Глава 5. Микроэлементный состав древесных растений 109

5.1. Характеристика локального биогеохимического фона 109

5.2. Изменения микроэлементного состава органов древесных растений 112

5.3. Связь микроэлементного состава древесных растений и почв 115

5.4. Аккумулятивный потенциал древесных видов 119

Выводы 122

Глава 6. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова и древесной растительности горнопромышленных центров 123

6.1. Техногенная геохимическая трансформация почв горнопромышленных центров 123

6.2. Экологическая опасность загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами почвенного покрова 126

6.3. Техногенная биогеохимическая трансформация растений 132

6.4. Экологическое состояние растений 136

Выводы 145

Заключение 148

Список использованной литературы 151

Приложения 174

Приложение 1. Содержание ТММ и физико-химических свойств поверхностных горизонтов почв и ТПО в зоне влияния ДВМК 175

Приложение 2. Содержание ТММ и физико-химических свойств поверхностных горизонтов почв и ТПО в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» 183

Приложение 3. Содержание ТММ и физико-химических свойств почвенных горизонтов в зоне влияния ДВМК 196

Приложение 4. Содержание ТММ и физико-химических свойств почвенных горизонтов в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» 201

Приложение 5. Содержание ТММ в ассимилирующих и многолетних органах древесных растений в зоне влияния ДВМК 204

Приложение 6. Содержание ТММ в ассимилирующих органах древесных растений в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» 208

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и ее разработанность. В условиях роста населения неизбежно увеличиваются объемы потребления минерально-сырьевых ресурсов, добыча которых 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). Активное развитие горнопромышленных районов сопровождается извлечением и обогащением полезных ископаемых, в результате которых образуются значительные объемы отходов.

Освоение месторождений цветных металлов способствует возникновению городов-рудников и городов-заводов. Геохимическая специализация их территорий во многом определяется металлогенической спецификой литогенной основы. Однако антропогенное воздействие нарушает биологический круговорот, геохимическую структуру и функционирование природных ландшафтов (Авессаломова, 2004; Борисенко, Несвижская, Сорокина, 1974; Буренков, 1997; Опекунова, 2013; Перельман, Касимов, 1999; Bech и др., 1997; Serbula и др., 2012) и в конечном итоге приводит к формированию на их месте техногенных ландшафто-геохимических систем с аномально высоким содержанием тяжелых металлов и металлоидов (**ТММ**), для которых характерно слабоконтролируемое рассеяние (Касимов, 2013) и высокая токсичность для живых организмов (Автухович, 1999; Beckett, Freer-Smith, Taylor, 2000). Геохимическая трансформация природных ландшафтов нередко создает серьезную угрозу здоровью населения (Белан, 2006; Буренков, 1993; Ковальский, 1991; Loredo, Ordonez, Alvares, 2006), поэтому исследования экологических последствий деятельности горнопромышленных предприятий активно ведутся во многих странах мира.

В зоне влияния горно-обогатительных комбинатов (**ГОК**) формируются специфические горнопромышленные ландшафты, в которых можно выделить депонирующие среды (почвы, растения, донные отложения и др.), в которых накапливаются и преобразуются продукты техногенеза, и транзитные (снег, пыль, водотоки, поверхностные и подземные воды и др.), принимающие техногенные выбросы (Перельман, Касимов, 1999; Сает и др., 1990; Экологические функции …, 2004). Экологические последствия этой деятельности можно оценить на основе изучения химического состава почв, являющихся геохимическим барьером на пути миграции ТММ в грунтовые воды, и древесной растительности, выступающей в роли естественного универсального фильтра, аккумулирующих и инактивирующие многие токсичные компоненты техногенных выбросов в течение длительного периода времени (Автухович, 1999; Касимов, 2013; Касимов, Никифорова, 2004; Опекунов, Опекунова, 2013; Опекунова, 2013; Опекунова, Гизетдинова, 2014; 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, Н.Я. Трефилова, А.А. Беус и др. (Беус, Грабовская, Тихонова, 1976; Беус, Григорян, 1975; Борисенко, 1992; Борисенко, Несвижская, Сорокина, 1974; Буренков и др., 1990; Буренков, 1997; Буренков, Янин, 2001; Головин и др., 2000; Иванов и др., 2001; Морозова, 1993, 2000; Сает, Башаркевич, Ревич, 1982; Сает, Онищенко, Янин, 1986; Сает, Ревич, 1988; Янин, 1993, 1999; Прикладные…, 1993; Геохимические…, 1994; Геохимические…, 1998).

В этоже время впервые был выявлен значительный уровень загрязнения компонентов окружающей среды в районе складирования отходов (Blair и др., 1980; Borman, Watson, 1976; Chemistry …, 1988). В дальнейшем большое количество работ было посвящено исследованиям хвостохранилищ в окислительных условиях (Бортникова, Гаськова, Айриянц, 2003; Елпатьевский, 2003; Удачин, Ершов, 1995; Усманов, 1995; Чесноков, Бушмакин, 1995; Dubrovsky и др., 1985; Nordstrom, 1982) и прогнозу состояния природной среды в результате их разрушения (Бортникова, 2001; Елпатьевский, 1993; Acosta и др., 2011; Anawar и др., 2011; Conesa и др., 2011; Gomez-Alvarez и др., 2009; Lizarraga-Mendiola и др., 2009; Milu, Leroy, Peiffert, 2002; Owor и др., 2007; Rey и др., 2013); биоиндикации загрязнения воздушного бассейна (Опекунова, 2013; Опекунова, Гизетдинова, 2014; Serbula и др., 2012); изучению транслокации микроэлементов в системе почва-растения-живые организмы (Гедгафова, Улигова, 2007; Елпатьевский, 1993; Ладонин, 2002; Опекунова и др., 2015; Ghaderian, Ghotbi Ravandi, 2012; Santos и др., 2012; Wahsha и др., 2012; Heavy…, 2013); пространственному и профильному распределению различных форм ТММ в почвах как основной депонирующей среде (Опекунова, 2013; Candeias и др., 2011; Garcia-Sanchez, Alonso-Rojo, Santos-Frances, 2010; Gomez-Alvarez и др., 2007; Rastmanesh и др., 2011). Однако подходы к экологической оценке и зонированию горнопромышленных территорий в условиях литолого-геохимической неоднородности разработаны слабо (Авессаломова, 1986, 2004; Махинова и др., 2014). Недостаточно изучены ведущие процессы и механизмы, способствующие закреплению ТММ в почвах, что затрудняет их эффективную ремедиацию и рекультивацию.

Объектами диссертационной работы явились два горнопромышленных центра: Зака-

менск (Республика Бурятия, Россия) и Эрдэнэт (Орхонский аймак, Монголия), расположенные в бассейне р. Селенги и состоящие шахтно-карьерно-отвальных участков, хвостохранилищ, промплощадок ГОКов, зон влияния предприятий и территорий прилегающих городов. Бассейн р. Селенги площадью 447 000 км^2 расположен на территории Монголии (67 %) и Российской Федерации (33 %) и поставляет около 50 % общего стока в оз. Байкал (Тулохонов, 2011). В последние десятилетия сток речных наносов в верхней части бассейна возрос в связи с активизацией горнодобывающих работ, промышленной и сельскохозяйственной деятельности в Монголии (Stubblefield и др., 2005). Для целостной характеристики экологического состояния бассейна р. Селенги необходимо проводить исследования наиболее крупных источников загрязнения – «горячих точек» (hot spots), поставляющих большие объемы поллютантов. Такими являются горнопромышленные территории, при освоении которых формируются техногенные ландшафтно-геохимические системы, состоящие из градообразующих предприятий, карьеров, отвалов вскрышных пород, мест складирования отходов (хвостохранилищ), возникающих при этом селитебных и рекреационных зон и т.д.

В Закаменске с 1934 по 2001 гг. градообразующим предприятием был Джидинский W-Mo комбинат (**ДВМК**), который образовал 44,5 млн. тонн отходов обогащения, складированных в двух основных хвостохранилищах – Джидинском (насыпном) и Барун-Нарынском (гидроотвале) – и одном аварийном. Производство W концентрата составляло 73-80 % от общего объема добычи в СССР. Разработки велись в пределах Джидинского рудного поля, в состав которого входили молибденовое Первомайское, сульфидно-вольфрамое Инкурское и Холтосонское месторождения. В Эрдэнэте с 1976 г. до сегодняшнего дня ведется разработка одного из крупнейших в мире месторождений Cu-Mo руд. Объем руды, добываемой совместным российско-монгольским предприятием ГОК «Эрдэнэт», на сегодняшний день составляет 27,8 млн. т в год. За 40-летний период работы комбината в долине р. Зуна-Гол образовалось хвостохранилище площадью более 1500 га и высотой плотины более 85 м. Сульфидные месторождения разрабатываемых Джидинского и Эрдэнэтского рудных полей относятся к эндогенно-магматогенной серии, гидротермальной группе, плутогенному классу, типу штокверковых и жильных высокотемпературных. Они ассоциируются с кислыми, средними и щелочными магматическими комплексами и формировались на познеинтрузивной и постинрузивной стадиях (Смирнов, 1976).

Предшествующими исследованиями установлены геологические особенности рассматриваемых территорий (Альмухамедов, Гордиенко, Кузьмин, 1996; Берзина и др., 2009; Берзина, Сотников, 2007; Булгатов, Климук, 1998; Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010; Гордиенко и др., 2007; Гордиенко и др., 2012; Малютин и др., 2007; Моссаковский, Томуртогоо, 1976; Повилайтис, 1960; Симонов и др., 2014; Хасин и др., 1977; Watanabe, Stein, 2000), специфика

производственного цикла (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001; Набойченко, Цогтхангай, Доржпурэв, 1982; Пестряк, Эрдэнэтуяа, 2012; Цогтхангай и др., 2011), процессы современного минералообразования (Юргенсон, Смирнова, Меркулов, 2008), химический состав отходов в хвостохранилищах (Смирнова, Дампилова, 2010; Ходанович и др., 2002), дана экологическая и экономическая оценка городов (Бямба, 2007; Куликов и др., 2012; Смирнова, Плюснин, 2013; Хамнаева, Куликов, Цыдыпов, 2013; Шагжиев, Раднаев, Ральдин, 1997; Battogtokh, Lee, Woo, 2014). Вопросы эколого-геохимического состояния ландшафтов и зонирования территорий исследованы слабо.

Диссертационная работа содержит комплексную сравнительную ландшафтно-геохимическую оценку техногенной трансформации горнопромышленных центров в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» и ДВМК с исследованием широкого перечня ТММ, характеристикой особенностей их пространственного распределения в поверхностных (0-10 см) горизонтах почв и органов древесной растительности. В ходе выполнения работы были созданы геоинформационные системы изучаемых горнопромышленных центров и методические принципы автоматизированного построения карт родов элементарных ландшафтов. Путем анализа радиальных и латеральных коэффициентов дифференциации ТММ исследовано катераное и внутрипрофильное распределение элементов с выявлением основных типов геохимических барьеров.

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 Wo-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 ГОК «Эрдэнэт» и ДВМК 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 (Закаменск – 132 пробы, включая 27 фоновых; Эрдэнэт – 226, включая 32 фоновых), древесной растительности (Закаменск – по 32 образца листьев и коры березы и по 21 – хвои и коры лиственницы, Эрдэнэт – 29 проб листьев тополя и 20 – хвои лиственницы) и заложением катен (Закаменск: 31 почвенный разрез в 7 катенах; Эрдэнэт – 18 в 6). 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 детального анализа выбрано 16 приоритетных загрязнителей с атомной массой больше 50 атомных единиц и типичных для W-Mo и Cu-Mo месторождений (Сает и др., 1990). Валовое содержание ТММ определялось масс-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой (приборы «Elan-6100» и Optima-4300 фирмы «Perkin Elmer», США) в ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского.

При обработке данных применялись геохимические показатели – рассчитывались кларки концентрации и рассеяния (*КК* и *КР*), глобальный (*EF_g* и *DF_g*) и локальный (*EF_l* и *DF_l*) коэффициенты концентрации и рассеяния, суммарный (Z_c) и интегральный (*ИПЗ*) показатели загрязнения, биогеохимической трансформации (Z_v) и др. Статистические показатели включали выборочные средние (*m*), ошибки средних, средние квадратичные отклонения (σ), коэффициенты вариации (C_v), максимальные (*max*) и минимальные (*min*) значения, коэффициенты корреляции (*r*) и др. Среди картографических методов использовались локальная интерполяция, построение цифровой модели рельефа и зон затопления и др., реализованные в ГИС-пакетах MapInfo и ArcGIS.

Научная новизна работы. В работе 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-таежная, серогумусовая метаморфизованная, аллювиальная; в Эрдэнэте: подтипы каштановых) и органов древесной растительности: березы плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukaczev*), лиственницы сибирской (*Lárix sibírica Ledeb.*) и гибридного 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 ла-

теральной 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 накопления построены карты латеральных геохимических барьеров.

Полиэлементное загрязнение почвенного покрова и растительности в условиях природных литогеохимических аномалий предложено оценивать комплексом интегральных геохимических индексов – суммарным (Z_c) и интегральным (*ИПЗ*) показателями, 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 коэффициентом биогеохимической трансформации микроэлементного 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 и степень достоверности результатов. Автором проведено геохимическое опробование компонентов ландшафтов; выполнено определение основных физико-химических свойств почв (гранулометрический состав, *pH*, содержание органического углерода); статистическая обработка и обобщение полевых и лабораторных материалов; анализ литературных источников. Самостоятельно созданы геоинформационные системы Закаменска и Эрдэнэта, содержащие моно- и полиэлементные карты пространственного распределения ТММ и другую картографическую и атрибутивную информацию. Табличный и иллюстративный материал, если не отмечено иное, подготовлен автором. Достоверность полученных результатов обеспечивается большим объемом фактического материала, полученного в сертифицированных лабораториях современными химико-аналитическими методами, и адекватными методами его анализа и обработки.

Защищаемые положения.

1. Приуроченность горнопромышленных центров Закаменска и Эрдэнэта к природным геохимическим аномалиям проявляется в высокой изменчивости содержания рудных элементов (W, Mo, Cu) и 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 Эрдэнэтского 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 фактические данные о современной экологической ситуации в горнопромышленных центрах Закаменск и Эрдэнэт, научное объяснение и характеристику миграции и пространственного распределения ТММ в горнопромышленных ландшафтах. Исследования проводились при поддержке:

- Российского фонда фундаментальных исследований (**РФФИ**, Проект №13-05-92221-Монг_а «Геохимическая оценка экологического состояния природной среды в крупных горнопромышленных центрах бассейна р. Селенги»);
- Русского географического общества (**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»);

- РФФИ-РГО (проект № 13-05-41191 «Интегральная оценка и картографирование качества городской среды на основе анализа ландшафтно-геохимических данных»);
- Российского научного фонда (**РНФ**, проект №14-27-00083 «Пространственно-временной анализ миграции химических элементов и соединений в природных и антропогенных ландшафтах»);
- ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы» (Госконтракт № 11.519.11.5008 «Разработка научно-методических основ мониторинга и прогнозирования состояния бассейна р. Селенга с целью контроля трансграничного переноса загрязняющих веществ и их выноса в оз. Байкал и оптимизации использования и охраны водных ресурсов»);
- ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. (Госконтракт № П1078 «Разработка теоретических, экспериментальных и прикладных основ экологической геохимии ландшафтов»);
- Совместной российско-монгольской комплексной биологической экспедиции Российской академии наук и Академии наук Монголии (**СРМКБЭ**).

Материалы использовались 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 быть использованы при ландшафтно-геохимических исследованиях горнопромышленных ландшафтов в других регионах России.

Апробация работы, публикации. Результаты изложены в статьях, опубликованных в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, Scopus, Web of Science, доложены на Международных и Всероссийских конференциях. По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 5 в журналах из перечня Web of Science.

Материалы представлены на 11 Международных и 3 Всероссийских конференциях: VII международной научно-практической конференции «Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде» (Семипалатинск, 2012); IX международной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие Монгольского плато и сопредельных территорий» (Улан-Удэ, 2013); «Экологические проблемы антропогенной трансформации городской среды» (Пермь, 2013); III международной научно-практической конференции «Современные проблемы географии и геологии» (Томск, 2014); V международном симпозиуме «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах» (Санкт-Петербург, 2014); Международной конференции «Bringing together Selenga-Baikal research» (Лейпциг, 2014); General Assembly of the European Geosciences Union (Вена, 2014, 2016); 30th Conference of the Society for Environmental Geochemistry and Health (Ньюкасл, 2014); International Geographical Union Regional Conference "Ge-

ography, culture and society for our future Earth" (Москва, 2015); Международная конференция «Экосистемы центральной Азии в современных условиях социально-экономического развития» (Улан-Батор, 2015); II всероссийская конференция «География, общество, окружающая среда» (Москва, 2016); 2nd International Conference on Agricultural and Biological Sciences (Шанхай, 2016), Всероссийская научная конференция «Геохимия ландшафтов» к 100-летию А.И. Перельмана (Москва, 2016).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на 209 страницах печатного текста, содержит 50 рисунка и 22 таблицы. 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 Монгольской академии наук, Совместной российско-монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АНМ и Байкальского института природопользования СО РАН за помощь в организации полевых работ; Е.В. Терской и Л.В. Добрыдневой и сотрудникам ВНИИ минерального сырья имени Н.М. Федоровского (ВИМС) за проведение ряда анализов; М.И. Богданову, А.В. Старицыну, О.К. Смирновой, С.П. Гавриловой, Л.А. Вайсбергу за предоставленные научные и фондовые материалы и оказанное содействие; А.А. Алексеенко, И.А. Алексеенко и всем коллегам-сотрудникам кафедры геохимии ландшафтов и географии почв, участвовавшим в экспедиционных исследованиях, лабораторных работах и за консультации; родителям В.Г. Тимофееву, Л.О. Тимофеевой, сестре А.В. Тимофеевой, жене Н.А. Тимофеевой за всестороннюю помощь и поддержку; В.Ю. Слободяну и И.А. Королеву за возможность продолжать работы в области фундаментальной науки

ГЛАВА 1. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Физико-географические условия района Закаменска

1.1.1. Географическое положение и рельеф

Территория горнопромышленного центра располагается в 460 км на юго-запад от г. Улан-Удэ (республика Бурятия) и в 230 км на запад от железнодорожной станции Джида, стоящей на международной Восточно-Сибирской железной дороге Улан-Удэ – Улан-Батор (рис. 1). В результате производственной и градостроительной деятельности ДВМК на правом берегу р. Джиды сформировался природно-техногенный комплекс, площадь которого более 200 км^2. Естественные границы проходят по водоразделам основных рек – Мыргэншено (восток), Модонкуль (запад), Джида (север) и верховьям ручьев Хасуртый – Бургуриктай (юг).

Рис. 1. Картасхема района исследования в Закаменске

В региональном геоморфологическом плане территория Закаменска расположена в южной части Монголо-Сибирского горного пояса и приурочена к Селенгино-Витимской зоне – морфоструктуре 2-го порядка с умеренной неотектонической активизацией недр (Уфимцев, 1991). Район исследования находится на северных отрогах Джидинского хребта, представляющего собой плоский горный кряж, протягивающийся в широтном направлении, по водораздельной части которого проходит граница с Монголией. Абсолютные отметки пойм в долинах увеличиваются от 1100 м в устьевых частях до 1500 м в истоках. В том же направлении растут высоты водоразделов от 1200-1300 до 1500-1700 м. Глубина расчленения рассматриваемой тер-

ритории, т.е. превышение водораздельных гребней над тальвегами долин, составляет 300-400 м (Зиновьева и др., 2011).

В формировании современного рельефа, наряду с экзогенными факторами, немаловажную роль сыграли крупные тектонические зоны, по которым образовались долины рек Модонкуль, Мыргеншено, ручьев Инкур, Барун-Нарын, Зун-Нарын, Гуджирка и др.

Основной единицей эрозионно-тектонического среднегорного типа является Джидинский хребет. Склоны водоразделов этого типа рельефа имеют в основном симметричное строение и различную крутизну. Склоны со средней крутизной покрыты чехлом делювиальных отложений. Крутые же склоны, преимущественно обвально-осыпные, часто со скалистыми вершинами, сложены коллювиальными отложениями, которые накапливаются в виде шлейфов.

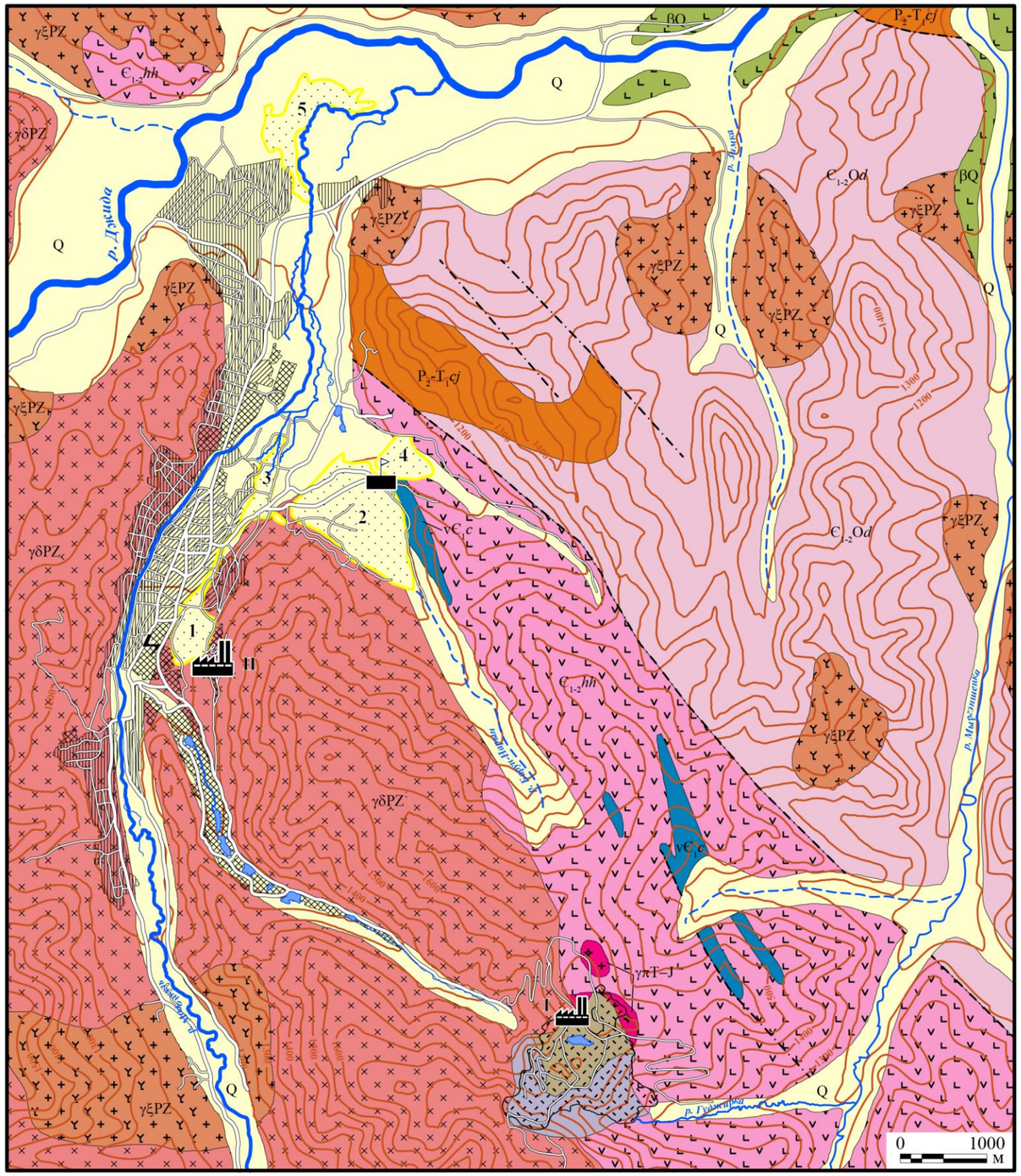
1.1.2. Геологические условия

Закаменск приурочен к границе двух региональных геологических структур, представленных карбонатно-терригенными толщами нижнего палеозоя Джидинского синклинория и интрузивами гранитоидов Модонкульского массива. Граница между ними в районе горнопромышленного центра проходит по днищу долины ручья Барун-Нарын, вдоль нее развита зона пород, характерных для крупных региональных долгоживущих разломов – пластины пород ультраосновного состава, мелкие тела гранитоидов среди интенсивно смятых и рассланцованных осадочно-вулканогенных пород (Папов, 2007).

Исследуемая территория сложена преимущественно нижнепалеозойскими породами: вулканогенно-терригенной нижнекембрийской хохюртовской свитой (рис. 2), на которой залегают кембрий-ордовикские песчаники, сланцы, известняки джидинской свиты и др. Выше залегают основные эффузивы черноярovской свиты верхнепермского-нижнетриасового возраста, которые, в свою очередь, перекрыты кислыми эффузивами цаган-хунтейской свиты триаса (Зиновьева и др., 2011).

Район природно-техногенного комплекса относится к области ранних каледонит, в котором выделяются палеозойский, мезозойский и кайнозойский структурные ярусы. Палеозойский структурный ярус представлен кембрий-ордовикскими терригенно-карбонатными отложениями хохюртовской и джидинской свит, слагающими сложно построенную структуру – Джидинский синклинорий, протягивающийся в северо-западном направлении на 160 км при ширине 50 км.

Внутреннее строение синклинория осложнено сочетанием комплекса разрывных и складчатых структур второго порядка (Хургата-Хамнейская и Уленга-Дархинтуйская синклинали, Шарбагатайская и Уленга-Шара-Азаргинская антиклинали). Формирование указанных структур сопровождалось развитием магматических процессов, среди которых выделяются две фазы: доскладчатая и постскладчатая. Первая проявилась в излиянии венд-нижнекембрийских эффузивов, вторая – в формировании баталитов джидинского комплекса.



Условные обозначения

Кайнозойские образования

Четвертичная система

Аллювиальные отложения. Галечники, пески, супеси, суглинки (Q)

Оливиновые долинные базальты (βQ)

Мезозойские образования

Гуджирский комплекс. Лейкократовые граниты, гранит-порфиры (γπT-J)

Нерасчлененный палеозойско-мезозойский комплекс

Чернояровская свита. Ортофиры, кератофиры, туфы, туфолавы (P_2-T_1cj)

Палеозойские образования

Кембрийская система

Джидинская свита. Песчаники, алевролиты и известняки ($Є_3$-O*d*)

Хохюртовская свита. Основные и средние вулканиты, известняки и метасланцы ($Є_{1-2}hh$)

Джидинский комплекс

Вторая фаза. Граниты, граносиениты, сиениты (γξPZ)

Первая фаза. Плагионраниты гранодиориты, диориты (γδPZ)

Цакирский комплекс. Серпентиниты по дунитам и перидотитам ($vЄ_1c$)

Другие условные знаки

Городская застройка

Промышленная застройка

Дачная застройка

Транспортная

Природно-рекреационная (не заштрихованные участки)

Объекты промышленной застройки

Промплощадки Джидинского W-Mo комбината:
фабрика первичного дробления (I),
флото-гравитационного обогащения (II)

Отвалы техногенных песков:
Джидинское (1), Барун-Нарынское (2), аварийное (3), Зун-Нарынское (4) хвостохранилища;
Модонкульское техногенное месторождение (5)

Обогатительная фабрика ЗАО «Закаменск»

Отвалы вскрышных пород

Промплощадка ТЭЦ Закаменск

Карьеры Первомайского (Mo) и Инкурского (W) рудников

Рис. 2. Фрагмент государственной геологической карты 1997 г. с изменениями автора (Зиновьева и др., 2011)

При орогенных движениях в конце палеозоя – начале мезозоя были заложены глубинные разломы, с которыми связано массовое излияние сначала основных эффузивов чернояровской свиты, а затем кислых цаган-хунтейской свиты. Эффузивы собраны в пологие складки северо-восточного и северо-западного направлений.

В раннюю фазу киммерийской складчатости произошло внедрение интрузивных пород куналейского и гуджирского комплексов. Гранитоиды гуджирского комплекса, с которыми связаны все известные в районе редкометальные проявления, залегают в виде штокообразных тел и даек, приуроченных к зонам глубинных разломов северо-западного направления.

В мезозое были заложены субширотно ориентированные прогибы и поднятия, в значительной степени определившие современный геоморфологический облик территории. В узких тектонических депрессиях накапливались терригенные отложения сангинской свиты и гусиноозерской серии. В палеогене и неогене продолжался процесс общего поднятия с дифференцированными движениями земной коры, сопровождавшимися излияниями базальтовой магмы.

В пределах Джидинского производственно-техногенного комплекса наиболее крупный разлом наблюдается в бассейнах рр. Модонкуль и Шара-Азарга. Здесь он проходит по восточному крылу Уленга–Шара-Азаргинской антиклинали. Ширина зоны около 1 км, протяженность более 25 км. Разлом состоит из серии субпараллельных нарушений, ориентированных на северо-запад (300-320º). Их большая часть принадлежит сбросам и взбросам, которые сопровождаются зонами дробления и катаклаза. Амплитуда перемещения по ним достигает 1000 м. Заложение разлома произошло в нижнем палеозое. Позднее неоднократно происходило обновление разлома. Вдоль него развит контакт нижнепалеозойских вулканогенно-осадочных пород и гранитоидов джидинской интрузии. Разлом является основной рудоконтролирующей (приурочены штоки и дайки рудоносных гуджирских гранитоидов) и рудовмещающей (Первомайское, Инкурское, Холтосонское месторождения) структурой.

1.1.3. Климатические условия

Район располагается в зоне резко континентального климата. Его особенности определялись на основе многолетних наблюдений на метеорологической станции Цакир (Зиновьева и др., 2011).

Среднемноголетняя годовая температура воздуха составляет -3,9 °С. Сезоны года выражены ясно. В зимнее время господствует устойчивая область высокого давления – сибирский антициклон, который обусловливает преобладание морозной малооблачной погоды со слабыми ветрами, малым количеством осадков и развитием процессов выхолаживания. Среднемесячная температура января -25,4 °С (рис. 3 А), минимальная -49 °С. Амплитуда суточных температур составляет 15-20 °С. Число дней со снежным покровом 148, а его высота – в среднем 5-10 см (Тулохонов, Абидуева, 2000).

Лето наступает в третьей декаде мая, характеризуется увеличением количества солнечной радиации и усиленным прогревом воздуха, выносом теплого воздуха с юга в передней части циклонов. Лето короткое, теплое, а в отдельные годы жаркое. Среднемесячная температура воздуха июля составляет +15,8 °С (рис. 3 А), а максимальная +35 °С. В летнее время усиливается циклоническая деятельность. В этот период выпадает большая часть осадков – 70% годовой нормы, осадки преимущественно ливневые, что положительно влияет на очищение атмосферы. Среднегодовое количество осадков составляет 250-400 мм (рис. 3 А).

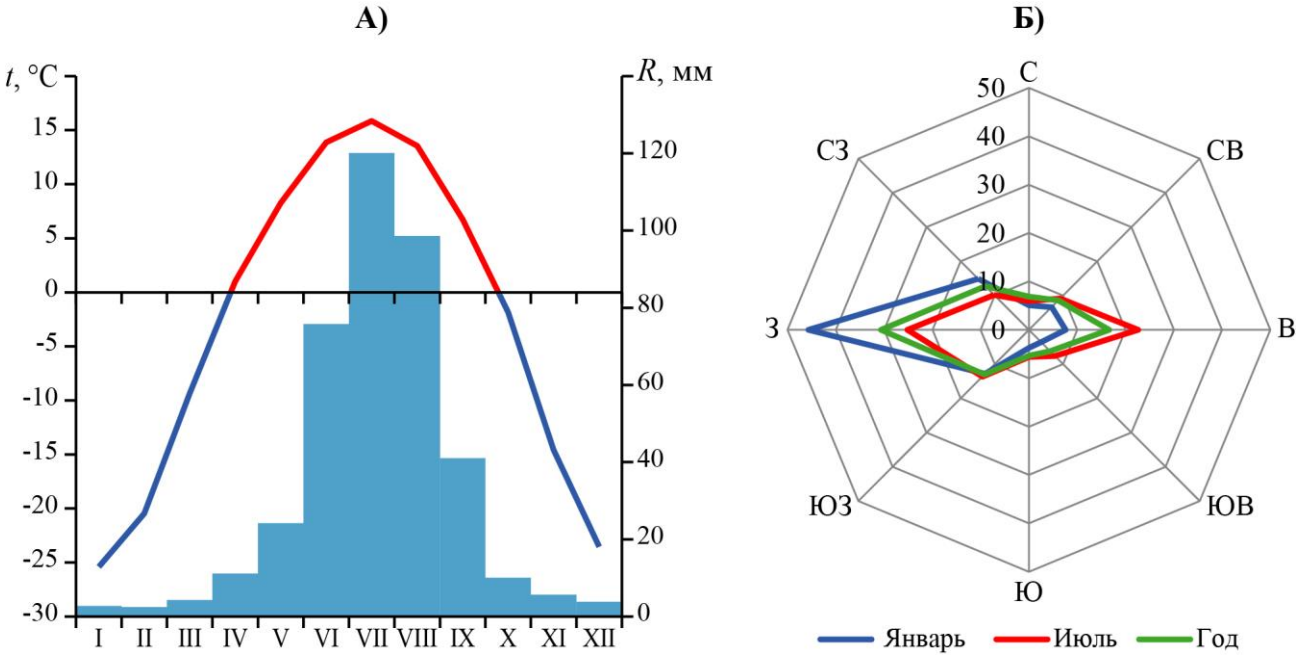


Рис. 3. Метеорологические показатели по данным метеостанции Цакир (составлено по архивам «Государственного фонда данных о состоянии природной среды» и автоматизированной информационной системы обработки режимной информации (Булыгина, Разуваев, Александрова, 2014)): А) – годовой ход среднемесячных температур (*t*) за 1940-2015 гг. и осадков (*R*) за 1966-2015 гг.; Б) – роза ветров за 1966-2015 гг.

Ветер является важным геохимическим фактором и переносит в пределах горнопромышленного центра огромные массы тонких частиц, которыми сложены хвостохранилища. Он преимущественно западного и восточного направлений – 31% и 17% соответственно (рис. 3 Б). Повторяемость западных ветров достигает максимальных значений зимой (46%), восточных – летом (23%). В июле-августе несколько возрастает частота юго-восточного и юго-западного направлений (до 8-14%), а в феврале-декабре – северо-западных (12-14 %). Во все сезоны велика повторяемость штиля (70%), максимальных значений она достигает в зимние месяцы (до 94%).

В мае отмечается наиболее напряженный ветровой режим с усилением ветров северного направления, в результате чего в сравнительно узкой и глубоко врезанной долине р. Модонкуль, имеющей в нижнем течении субмеридиональное направление, ветер как в аэродинамической трубе имеет возможность набрать энергию, способную переносить не только

тонкие, но и песчаные частицы на большие расстояния. Среднегодовая скорость ветра составляет 1,0 м/с, достигаая максимальных значений (20 м/с) в апреле-мае и минимальных – декабре-январе (0,3 м/с).

По метеоусловиям территория Закаменска относится к зоне с очень опасным потенциалом загрязнения. Часты инверсии, особенно зимой в ночное время с установлением Азиатского антициклона. Периодические застои воздуха в приземном слое также способствуют загрязнению. Среди атмосферных условий рассеивания загрязнителей имеют значение: 1) скорость ветров; 2) число дней со штилевыми типами погод, когда самоочищение минимально; 3) число дней с туманами; 4) количество атмосферных осадков, способствующих вымыванию из атмосферы загрязняющих веществ.

1.1.4. Почвенный покров

Территория Закаменска в системе почвенного районирования относится к бореальному поясу, Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной зоне, Восточно-Саянской горной почвенной провинции (Добровольский, Урусевская, 2004). Исследования природных почв Бурятии и бассейна оз. Байкал представлены в работах достаточно подробно (Белозерцева и др., 2014; Зонн, П.И., 1935; Корсунов, Цыбжитов, 1989; Ногина, 1964; Ногина, Уфимцева, 1959; Прасолов, 1913; 1927; Семенова, 1957; Соколова, Соколов, 1963; Убугунов и др., 2012; Убугунова и др., 1998; Уфимцева, 1956; 1960; 1963).

Спецификой распространенных в данном районе почв, согласно работе Н.А. Ногиной (1964), является сильное влияние отрицательных температур в плотных породах и рыхлых наносах. Большой резер холода в течение всего летнего периода тормозит быстрое прогревание почв и обусловливает существование низких температур в нижней части профиля. В природных условиях на автономных позициях развиты горные дерново-таежные почвы (Министерство…, 1977). Профиль слаборазвитый, с большим количеством обломков почвообразующих пород, состоящий и бурого гумусового А1 и/или переходного А1С горизонтов, мощностью 5-15 см, с повышенным содержанием поглощенных оснований, нейтральной-слабокислой реакцией среды, отношением $C_{гк}$ / $C_{фк}$=0,9-1,2. По гранулометрическому составу почвы относятся к легко- или среднесуглинистым, содержание физического песка варьирует – 65-77%.

На крутых склонах под лесной, луговой и кустарниковой растительностью в условиях промывного или периодически промывного водного режима на породах с высоким содержанием карбонатов кальция развиваются дерново-карбонатные почвы. Морфологический профиль этих почв включает горизонты А1-В-C_{Ca}. Их физико-химические свойства отличает относительно высокое содержание гумуса (от 5 до 12%), в составе которого нередко преобладают гуминовые кислоты, отношение $C_{гк}/C_{фк}$ колеблется от 0,7-0,9 до 1,0-1,3. Реакция среды верхних горизонтов нейтральная, реже слабокислая, нижних – щелочная. Степень ненасыщенности из-

меняется в зависимости от глубины залегания карбонатов: при их высоком залегании находится в пределах 5-10, при низком до 40%. В почвенно-поглощающем комплексе доминируют кальций и магний. Содержание валовых форм полуторных окислов и илистой фракции почти не изменяется по профилю. По гранулометрическому составу почвы, также как и горные дерново-таежные, относятся к легко- или среднесуглинистым.

На пологих нижних частях склонов (межкотловинные понижения) распространены дерновые лесные почвы, не выделяемые ни в одной из классификаций, они могут быть отнесены к серым лесным (Министерство…, 1977) которые упоминаются в ряде работ (Ногина, 1964; Семенова, 1957; Уфимцева, 1960), а в новой классификации – к серым метаморфическим (Классификация…, 2004). Особенностью формирования этих почв является отсутствие элювиального или гумусово-элювиального горизонтов. Профиль представлен следующими генетическими горизонтами: A1-(A1B)-B-(B_{Ca})-C.

Содержание гумуса среднее (5-8%) и постепенно падает вниз по профилю, в его составе преобладают гуминовые кислоты ($C_{гк}$ / $C_{фк}$=1,0-1,3), . При наличии иллювиального горизонта содержание гумуса может возрастать, причем доля гуминовых кислот увеличивается. Реакция среды изменяется от слабокислой или кислой в верхних горизонтах до нейтральной и щелочной в нижних. Емкость поглощения – средняя, варьирует по профилю в пределах 15-30 мг-экв на 100 г почвы, увеличиваясь в гумусово-аккумулятивном и иллювиальном горизонтах. Ненасыщенность почв основаниями наблюдается только в верхней части (10-20%). Почвенно-поглощающий комплекс преимущественно представлен Ca^{2+} и Mg^{2+}, но также присутствует небольшое количество H^{+} и Al^{3+}.

В долинах рр. Джиды и Модонкуль вдоль русла распространены аллювиально-луговые почвы, формирующиеся под луговой, лугово-болотной растительностью и ивняками. Почвообразующими породами служат слоистые и неяснослоистые аллювиальные отложения песчаного и супесчаного состава. Эти почвы формируются в условиях периодического затопления паводковыми водами, а также под влиянием грунтовых вод. Это обуславливает оглеение в нижней части профиля, а также развитие процессов гидрогенной аккумуляции соединений Fe. Профиль представлен горизонтами: $A^{д}$-A1-B_g-BG-CG. Содержание гумуса в верхнем горизонте достигает значений от 3,5 до 6%, реакция среды колеблется в широких пределах (*pH*=4-6), что связано с особенностями физико-химического состава аллювия и процессов почвообразования в поймах.

1.1.5. Растительный покров

Ведущим фактором дифференциации растительного покрова является горный рельеф и экспозиция склонов, а также микроциркуляционные процессы воздушных масс, влажность воздуха, мозаичность почвенно-грунтовых условий, антропогенное воздействие и др. В спектре поясов представлены лесостепной и лесной. Первый характеризуется сложными сочетаниями

лесной, степной и интразональной (луговой и кустарниковой) растительности со следами антропогенного воздействия (Папов, 2007).

Лесная растительность представлена бореальными, таежными, светлохвойными лесами. Основной ценозообразующей породой является лиственница сибирская (*Larix sibírica Ledeb.*), отличающаяся высокой адаптивной толерантностью к резко континентальному климату и холодным почвам. Для этих лесов присущ относительно чистый древостой с незначительной примесью березы плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukaczev*) высотой 18-20 м. Подлесок образован различными видами кустарников, такими как рододендрон даурский (*Rhododendron dauricum*), береза кустарниковая (*Betula fruticosa*), пятилистник кустарниковый (*Pentaphylloides fruticosa*), шиповник иглистый (*Rosa aciculáris*), сперия средняя (*Spirea media*), кизильник черноплодный (*Cotoneaster melanocarpus*), голубика обыкновенная (*Vaccínium uliginósum*) и травяно-кустарничковым ярусом, отличающимся простотой строения, небольшой флористической насыщенностью с преобладанием таежных и борово-таежных видов.

Осиновые и березовые леса занимают меньшие площади, преимущественно тяготея в Закаменске к линейным объектам (дорогам, линиями электропередач). В большинстве случаев они образовались в результате интенсивных рубок и пожаров. По характеру местообитаний и видовому составу различают долинные и горносклоновые березняки. Первые формируются по бортам долин на пойменных и надпойменных террасах. Кустарниковый ярус разреженный, представлен таволгой (*Filipéndula*), ивой Бебба (*Salix bebbiana*), шиповником иглистым (*Rosa aciculáris*). Хорошо развит травостой с проективным покрытием 70-80%, представленный костяникой (*Rúbus saxátilis*), хвощом лесным (*Equisétum sylváticum*), полынью обыкновенной (*Artemísia vulgáris*), геранью Власова (*Geranium wlassovianum*), тысячелистником азиатским (*Achillea asiatica*), осокой стоповидной (*Carex pediformis*) и др.

Кустарниковые сообщества бассейна р. Джиды разнообразны по типологическому составу. Их можно разделить на три группы: приречные, подгорных долин и выположенных водоразделов, опушечные заросли. Приречные заросли представлены ивами Шверина (*Salix schwerinii*), прутовидной (*Salix viminalis*) и росистой (*Salix rorida*). Травостой обычно изрежен из-за густого кустарникового полога и имеет пятнисто-мозаичное сложение. На илистых грунтах встречаются хвощ речной (Equisétum fluviatile), осоки (*Cyperáceae*), белозор болотный (*Parnássia palústris*), бекмания восточная (*Beckmannia syzigachne*); на песчаных – горец перечный (*Persicária hydropíper*), девясил британский (*Inula britannica*), лютик сходный (*Ranunculus affinis*) и др. По мере удаления от берега реки к центральной части террасы количество ив уменьшается, и появляются кусты боярышника (*Crataégus*) и черемухи (Padus), под пологом поселяются свида белая (*Swida alba*), смородина черная (*Ríbes nígrum*) и двуиглая (*Ribes diacanthum*), шиповник иглистый (*Rosa aciculáris*) и таволга иволистная (*Spiraea salicifolia*).

Ерниковые и ивовые кустарниковые сообщества подгорных долин и выположенных водоразделов занимают слабодренированные участки долин рек, подгорных шлейфов и межгорных понижений. По берегам горных ручьев они заходят в лесостепной пояс. Ярус образован ивой крушинолистной (*Salix rhamnifolia*) и березой кустарниковой (*Betula fruticosa*), в качестве сопутствующих характерен рододендрон мелколистный (*Rhododendron parvifolium*). Травостой пушицево-осоковый с доминированием осоки Шмидта (*Carex schmidtii*), пушицы многоколосой (*Eriόphorum angustifόlium*), мятлика болотного (Poa palustris), вейника Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorfii*) и др.

Луговая растительность занимает достаточно- и/или избыточно-увлажненные участки в поймах рек, по низким террасам, на лесных полянах, в межгрядовых понижениях и ложбинах хребтов. Однако основные площади долинных лугов Закаменска имеют вторичное происхождение и сформировались в результате хозяйственной деятельности человека на месте лиственничных лесов и кустарниковых зарослей. Луга включают три формации: монгольскополевицевая, сформировавшаяся на слабо задернованных аллювиальных слоистых почвах и представленая монодоминантным сообществом из полевицы монгольской (*Agrostis mongolica*) и сопутствующих видов мятлик сибирский (*Poa sibirica*) и луговой (*Poa pratensis*), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina*); пырейная – представлена пыреем ползучим (*Elytrígia répens*); полидоминантная злаково-разнотравная – небольшие участки в прирусловой и центральной части поймы, среди травостоя доминируют мятлик сибирский (*Poa sibirica*), полевица Триниуса (*Agrostis trinii*), полевица монгольская (*Agrostis mongolica*), трищетинник сибирский (*Trisetum sibiricum*).

1.1.6. Поверхностные воды

В регионе развита густая гидрографическая сеть. Основной водной артерией является р. Джида (левый приток р. Селенги), которая в районе Закаменска протекает в субширотном направлении и принимает многочисленные притоки, наиболее значительные – рр. Модонкуль и Мыргеншенка. В пределах изучаемого горнопромышленного центра также текут реки-притоки Барун-Нарын и Зун-Нарын, небольшие озера, по всей видимости, древнепросадочного или старичного происхождения и заболоченные массивы, расположенные в тыловых швах долин рек.

Модонкуль. Река берет свое начало на северных склонах Джидинского хребта на высоте 1850 м и является притоком первого порядка р. Джида. Полная длина составляет 38 км, а горнопромышленный центр расположен на 3-11 км от ее устья. Общее направление течения меридиональное с юга на север. Площадь водосборного бассейна составляет 190 км^2, имеет сильно вытянутую вдоль русла эллиптическую форму с наибольшей шириной до 12 км (Папов, 2007). Сопредельными бассейнами являются: с востока р. Мыргеншенка, с запада – мелкие правобережные притоки р. Джиды, а с юга – реки Монголии.

По дну долины р. Модонкуль и ее притоков распространены аллювиальные отложения,

представленные галечниками, валунами и песками. Общая залесенность водосбора составляет 93%, заболоченность менее 4%. Речная сеть развита умеренно: имеется 21 приток, среди которых только три впадает в пределах г. Закаменска: Инкур, Барун-Нарын и Зун-Нарын (рис. 4).

Ширина долины в пределах города по водоразделам составляет 3-7 км, по дну – 300-350 м. Коренные берега большей частью крутые, с эрозионным врезом до 2-2,5 м, ширина русла колеблется от 10 до 30 м. По характеру водного режима р. Модонкуль относится к типу рек с весенним половодьем и летними дождевыми паводками. В годовом ходе выделяют следующие фазы: весеннее половодье, летне-осенняя межень, дождевые паводки, зимняя межень.

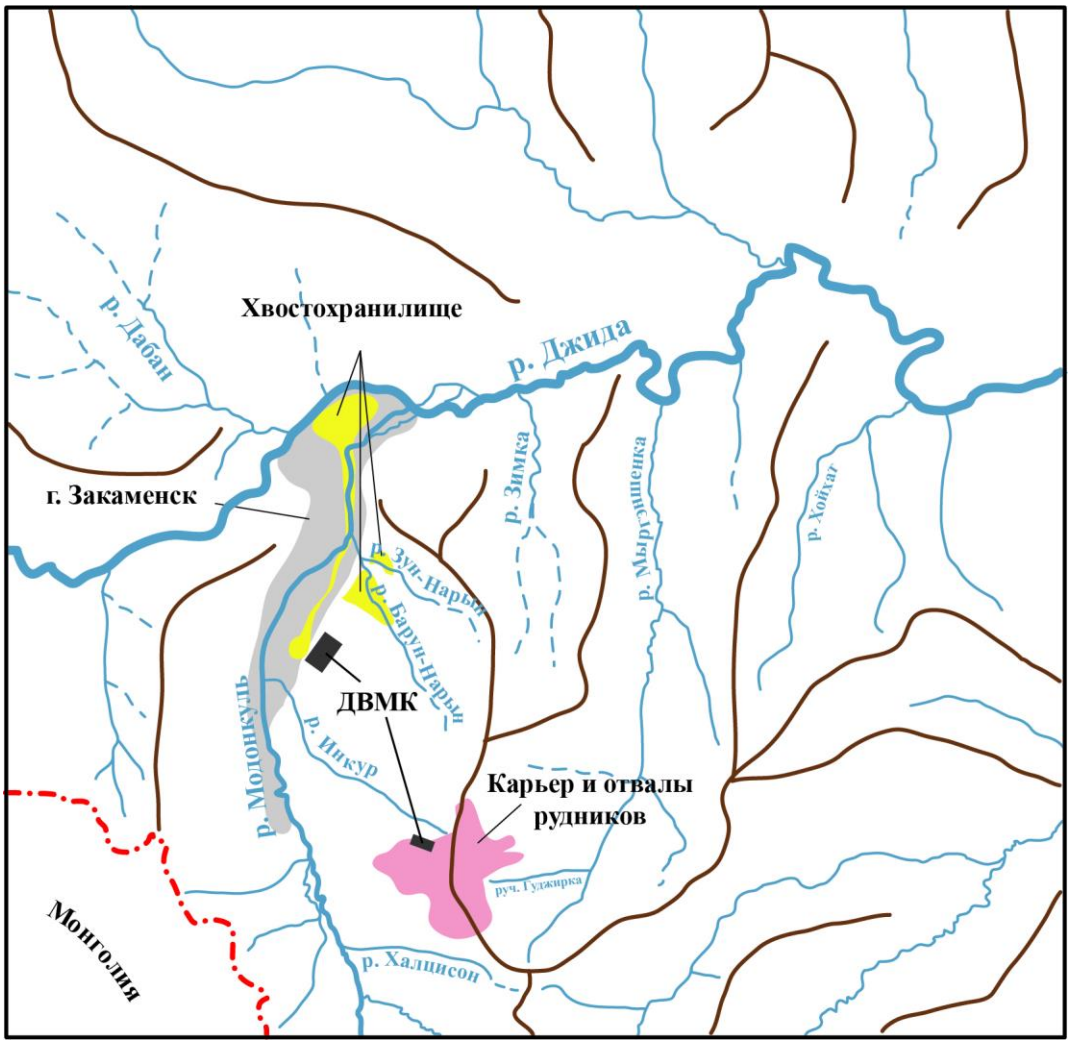


Рис. 4. Гидрографическая схема района Закаменск

По химическому составу речные воды выше впадения руч. Инкур имеют гидрокарбонатно-кальциево-магниевый состав с общей минерализацией до 0,1-0,2 г/л, а ниже – сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевый состав с общей минерализацией 0,1-0,4 г/л (Папов, 2007). Жесткость не превышает 2,5 мг-экв/л, содержание агрессивной углекислоты изменяется от 0,2 до 4,0 мг/л, реакция вод нейтральная. Температура колеблется от десятых долей градуса зимой до 14-18 °С летом.

Ручей Инкур. Берет начало из-под отвалов рудников Инкур и Первомайский, а также из

шахтных вод штолен рудника Холтосон в пределах коренных месторождений молибдена и вольфрама. Долина ручья в верховьях V-образная, в нижней части корытообразная, хорошо разработанная, со склонами, поднимающимися над уровнем долины на 200-300 м.

Протяженность ручья 7 км, в средней части он отведен в руслоотводной канал, площадь водосбора составляет 15 км^2. В 30-50 гг. XX века по ручью Инкур из его аллювия производилась старательская добыча золота и вольфрамового концентрата открытым способом. С 2008 г. продолжена механизированная добыча вольфрамовых концентратов силами ЗАО «Закаменск» (Зиновьева и др., 2011). Для ликвидации негативного воздействия отработки вольфрамовой россыпи на ручье создан каскад прудов-отстойников в нижней части ручья, в результате чего воды Инкура не доходят до р. Модонкуль (по полевым данным июня 2012 г.).

При отработке Инкурской россыпи формируются эфельные отвалы, которые в смеси с сапропелевыми осадками многочисленных мелких озер в долине р. Джиды предполагается использовать для рекультивации открытой поверхности хвостохранилищ отходов ДВМК и ЗАО «Закаменск» в долине р. Модонкуль, а также для техногенных песков Модонкульского месторождения и аллювиального шлейфа

Ручей Барун-Нарын. Берет начало в 7 км юго-восточнее Закаменска у подножия горы Барун-Нарын и течет в узкой долине трапецеидальной формы. Общая площадь водосбора составляет 12,6 км^2. На обоих склонах растет смешанный лес с редким кустарником. Пойма шириной более 300 м.

В 1-1,2 км выше устья ручей перекрыт плотиной с целью создания гидроотвала – Барун-Нарынского хвостохранилища. Высота плотины по состоянию на сентябрь 2011 г. 80 м, площадь хвостохранилища 142,6 га (Зиновьева и др., 2011).

По фондовым (Зиновьева и др., 2011) и полевым данным вода в ручье наблюдалась только в истоках в виде небольшого потока из мочажин полузаболоченного северного склона протяженностью менее 1 км. Существовавший ранее пруд-накопитель оборотных вод Барун-Нарынского хвостохранилища в настоящее время высох. Поверхностный сток руч. Барун-Нарын полностью аккумулируется и трансформируется в подземный под существующим хвостохранилищем.

Ручей Зун-Нарын. Имеет протяженность 5 км, площадь водосбора – 11,5 км^2. Расход воды составляет 0,003 м^3/с, однако во время полевого обследования 2012 г. вода наблюдалась только в истоках в виде небольшого потока из мочажин полузаболоченного северного склона протяженностью менее 750 м.

Долина ручья имеет трапециедальную форму с асимметричными склонами, заросшими смешанным лесом. По правому борту растут преимущественно береза плосколистная (*Bétula platyphýlla Sukaczev*), по левому – лиственница сибирская (*Larix sibírica Ledeb.*).

На сегодняшний день долина ручья представляет собой чашу нового Зун-Нарынского хвостохранилища. В его нижней части построена дамба высотой около 20 м и протяженностью 450 м. Выше дамбы в настоящее время сформировался пруд-накопитель оборотных вод с зеркалом 300 х 200 м и хвостохранилище площадью 350 х 450 м (Зиновьева и др., 2011). Ниже сразу под дамбой образовалось озерко с зеркалом 50 х 70 м, где аккумулируются инфильтрационные воды, которые просачиваясь, трансформируются в подземный сток в р. Модонкуль.

По правому борту ручья Зун-Нарын проложена дорога для вывоза твердых бытовых отходов из Закаменска. Разрешенная свалка мусора расположена в 1,5 км выше дамбы в нижней части правого склона долины. Стихийные свалки мусора наблюдаются, начиная от подножия дамбы до разрешенного полигона.

1.2. Техногенное воздействие в Закаменске

1.2.1. Характеристика месторождений

Первомайское месторождение расположено между падями Инкур и Гуджирка на абсолютных отметках 1540-1710 м. Оно проявляется в виде штокверкового оруденения в гранит-порфирах и сланцах, на долю которых приходится соответственно 72 и 27 % от общего объема руд. Минеральный состав руд для жил и прожилков представлен молибденитом, флюоритом, мусковитом, полевым шпатом, пиритом; для сланцев – молибденитом, пиритом, бериллом, галенитом, сфалеритом, халькопиритом (Зиновьева и др., 2011). Среднее содержание трехокиси W по месторождению – 0,032 %, Pb – 0,036-0,04, Zn – 0,026-0,038, Cu – 0,024-0,033. В молибдените содержалось до 15 % Re. В сульфидном сливе обогатительной фабрики присутствовали Cd (~ 0,14 %), Bi (1,07) и In (0,031) (Зиновьева и др., 2011).

Промышленная разработка Первомайского месторождения началась в 1942 г. Он включал карьер и отдельные цеха крупного дробления руды (рис. 5 А), расположенные севернее карьера, откуда руда после дробления сначала по узкоколейке, а затем по канатной дороге поступала на обогатительную фабрику (рис. 5 Б). Производительность карьера по руде в период эксплуатации постепенно наращивалась и с 1957 г. составила 830 тыс. т в год. Отработка до 1961 г. велась со стороны восточного склона (Гуджирского), а с 1961 г. вскрышные работы начали с западного (Инкурского) склона.

Общий объем вскрышных пород (пустая порода + забалансовые руды) в период 1961–1973 гг. составлял ~ 8 млн. м^3. Карьер не подвергался рекультивации, часть его объема заполнена вскрышной породой Инкурского рудника. На дне карьера находится «голубовато-зеленое озеро» (цвет ему придают растворенные соли меди) с реакцией среды *pH*=3,0-3,5 (рис. 5 Е).

Инкурское штокверковое месторождение расположено в центральной части Джидинского рудного поля на расстоянии 14 км от Закаменска. С востока к нему примыкает Первомай-

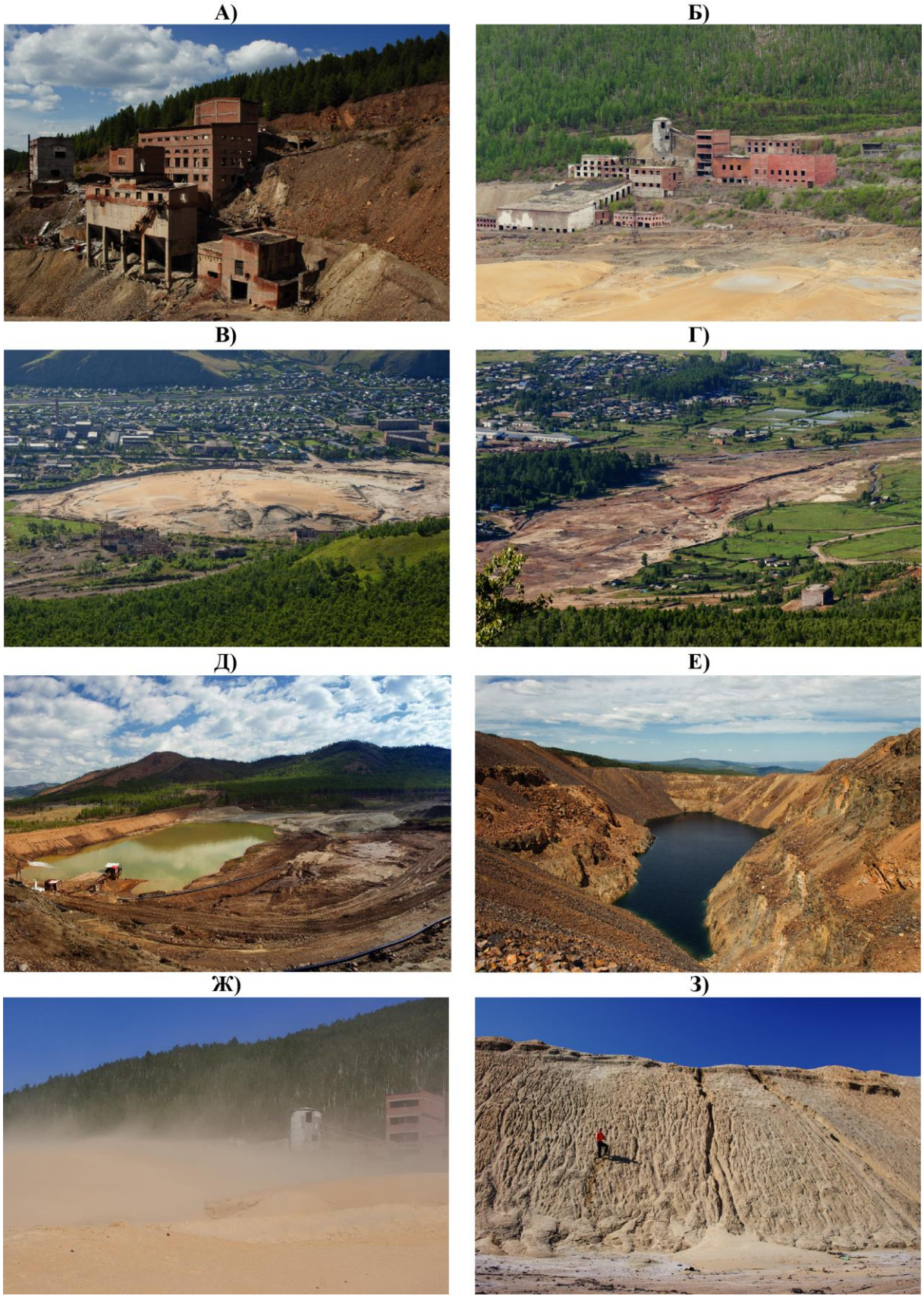


Рис. 5. Техногенные объекты в Закаменске по состоянию на 2012-2013 гг.: фабрики первичного дробления (А) и флотационно-гравитационного обогащения (Б). Хвостохранилища: Джидинское (В), аварийное (Г), Зун-Нарынское (Д). Озеро в карьере (Е). Современные экзогенные процессы: эоловый перенос (Ж), поверхностная эрозия (З).

ское молибденовое месторождение, а западнее и южнее располагаются кварц-гюбнеритовые жилы Холтосонского вольфрамового месторождения.

Протяженность месторождения составляет 2300 м при наибольшей ширине 850 м. Распространение балансовых руд на глубину достигает 400-450 м. Месторождение находится в горном районе с крутыми склонами, достигающими 40°. Максимальная отметка поверхности месторождения – 1760 м, а максимальное превышение поверхности месторождения над долиной реки Джиды равно 700 м.

Руды месторождения представлены рудоносными кварцевыми диоритами, рассеченными многочисленными дайками сиенитов и гранит-порфиров, а также кварцевыми, кварцево-полевошпатовыми, кварцево-мусковитовыми и сульфидными прожилками и жилами с гюбнеритом (Зиновьева и др., 2011).

Инкурское месторождение представляет собой крупное по масштабам, но бедное по содержанию W месторождение. Среднее содержание трехокиси W в штокверке – 0,147 %, а в руде 0,135-0,139 %. Минеральная форма W представлена в основном гюбнеритом, на долю шеелита в среднем приходится ~18 %. Наряду с W в рудах повсеместно присутствуют флюорит, окись Be, Bi, содержание которых на северном и южном участках месторождения составляет 4,0-4,35%, 0,045-0,046, 0,047-0,026 соответственно. Кроме того, в рудах в небольших количествах содержатся сфалерит (среднее содержание Zn в руде 0,055 %), галенит (0,012 Pb), халькопирит (0,012 Cu), пирит, апатит.

Холтосонское вольфрамовое месторождение расположено в западной части Джидинского рудного поля и граничит с месторождением Инкур. Вольфрамовое оруденение связано с кварцевыми жилами. На месторождении выделяются участки наибольшего насыщения жилами: в восточной части месторождения – участок Холтосон, в западной – участок Инкур, разделенные между собой участком, почти лишенным жил.

Рудные минералы месторождения представлены гюбнеритом, шеелитом, пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом (Зиновьева и др., 2011). Минерал гюбнерит, определяющий промышленную значимость жил и всего месторождения в целом, распределен в жилах весьма неравномерно, образуя гнездовые скопления, большей или меньшей мощности струи и редкую вкрапленность.

Основным ценным компонентом является триоксид W. К попутным компонентам относятся Pb, Zn, Cu и флюорит, среднее содержание которых составляет соответственно 0,5 %, 0,38, 0,16 и 3,9. В проектных документах они отнесены к компонентам, не имеющим по оценкам того времени промышленного значения, однако позднее неоднократно рассматривался вопрос комплексного извлечения ценных составляющих из холтосонских руд, но в период работы комбината эти работы и проекты не были реализованы.

Рудник Холтосон эксплуатируется с 1939 г. Отработка месторождения велась подземным способом. Проектная производительность, равная 250 тыс. т товарной руды в год, была достигнута в 1964 г. Ввиду гористого рельефа местности месторождение было вскрыто штольнями «Северная» и «Западная», пройденными из Инкурской пади и долины р. Модонкуль соответственно, из которых по состоянию на 2011-2012 гг. вытекают кислые (*pH*=3,0-3,5) шахтные воды.

1.2.2. Джидинский вольфрамо-молибденовый комбинат

Градообразующим предприятием с 1934 по 2001 гг. являлся ДВМК, созданный для эксплуатации молибденового (Первомайского), сульфидно-вольфрамового (Инкурского и Холтосонского рудного и россыпного) и золоторудного (Мыргэншено, Ивановка) месторождений. Предприятие занимало важное экономическое положение в Республике Бурятия и всем СССР: доля производства W концентрата составляла 73-80% от общего объема добычи в стране; в предвоенные и военные годы каждый третий танк и шестое орудие выпущены с применением легирующих металлов, поставленных ДВМК.

В W-Mo рудах содержатся ТММ I-III классов опасности – Pb, Zn, F, Mo, W, Be, Bi, As и др. (Зиновьева и др., 2011; Смирнова, Плюснин, 2013), при их обогащении методом флотации применялись токсичные реагенты – керосин, серная кислота, ксантогенат, сосновое масло, жидкое стекло и др., которые также накопились в хвостохранилищах. На обогатительную фабрику (рис. 5 Б), введенную в эксплуатацию в 1942 г. и по состоянию на 2011-2012 гг. находящуюся в заброшенном состоянии, поступала руда, содержащая в первый период работы в среднем 0,09 %, а с 1961 г. – 0,07 % сульфидного Mo.

Отвальные хвосты обогатительной фабрики ввиду отсутствия организованного хвостового хозяйства сбрасывались в р. Модонкуль: пульпа по деревянным лоткам протяженностью 2,5 км поступала в реку, в 300-400 м ниже первичного поселения. С течением времени самотечным методом сформировалось первое насыпное Джидинское хвостохранилище (Ходанович, 1999) примыкающее к промплощадке обогатительной фабрики (рис. 5 В) и представляющее собой линзовидную залежь площадью 600 х 300 м и средней мощностью 10,6 м (рис. 2). В его юго-восточной части находится спецотвал сульфидного промпродукта (Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002), созданный для его последующей переработки, которая в период деятельности комбината так и не была организована. Оно заполнялось с 1941 по 1958 гг.

Второе хвостохранилище – гидроотвал – расположено в долине р. Барун-Нарын (рис. 2), оно заполнялось с 1958 по 1997 гг. (Смирнова, Плюснин, 2013; Ходанович, 1999). Хвосты обогащения совместно с сульфидным промпродуктом транспортировались по пульпопроводу. Гидроотвал имеет форму равностороннего треугольника, основанием которого служит насыпная плотина высотой около 22 м, шириной 950 м и протяженностью вверх по долине реки 1700 м.

При нештатных ситуациях в 1964, 1968 и 1983 гг. отходы ДВМК сбрасывались по специально подготовленным каналам в долину р. Модонкуль, в район устья р. Барун-Нарын. В результате сформировалось аварийное хвостохранилище (рис. 5 Г) и шлейф переотложенных песков, имеющий в плане сложную конфигурацию и протягивающийся до р. Джиды на 7,5 км. В его пределах можно выделить пролювиально-аллювиальную, шириной от 50 до 500 м, и дельтовую части. Последняя, называемая Модонкульским месторождением техногенных песков (Ходанович, 1999), сформирована в устье р. Модонкуль, имеет в плане вытянутую на северо-восток форму, площадью 1 х 2,5 км, максимальной мощности 3-5 м. После закрытия предприятия формирование этой зоны аккумуляции техногенных песков продолжилось. Из-за не проведенных рекультивационных работ на поверхности хвостохранилищ отсутствует почвенно-растительный покров, а также произошло их полное иссушение. Все это послужило причиной сильно развитого эолового (рис. 5 Ж) и эрозионного процессов (рис. 5 З), выраженных в переносе большого количества материала в долину р. Модонкуль и формировании мелких бороздок, узких оврагов с крутыми тальвегами, водороинами и разрушении насыпной дамбы.

В 1997 г. градообразующее предприятие прекратило свою деятельность, а в 2001 исключено из реестра РФ из-за нерентабельности. При этом не были соблюдены санитарные и экологические требования, предъявляемые к закрываемым предприятиям: горные выработки не ликвидированы, не проведена рекультивация нарушенных земель, не прекращен сброс загрязненных шахтных вод в естественные водоемы, не приняты мероприятия по охране окружающей среды в Закаменске и прилегающих территориях.

За период деятельности ДВМК образовалось 44,5 млн. тонн отходов обогащения, складированных в два основных (Джидинское и Барун-Нарынское) и одно аварийное хвостохранилища, которые на протяжении многих лет являются источником загрязнения всего Джидинского природно-техногенного комплекса на площади более 200 км^2. В процессе воздействия экзогенных факторов (ветрового разноса и размыва поверхностными и атмосферными водами) химические элементы, в том числе токсичные, потенциально опасные и биоактивные, вовлекаются в процессы миграции и накапливаются на геохимических барьерах.

1.2.3. Другие промышленные предприятия города

Удаленность Закаменска от железной дороги (230 км) привело к формированию многоотраслевого хозяйства со сложной производственной структурой, позволяющей производить на месте все необходимое для добычи полезных компонентов и строительства инфраструктуры города. Помимо градообразующего предприятия на территории города зарегистрировано около 85 организаций производственной и непроизводственной сферы (Зиновьева и др., 2011). Структура промышленности представлена следующими отраслями (рис. 6): добыча полезных ископаемых (ЗАО «Закаменск»); топливной (ТЭЦ); заготовка и переработка древесины (ОАО МРА

«Джидинский вольфрам», ЗАО «Закаменск»); литьё металлов (ООО «Литейщик»), производство продовольственных товаров (ОАО «Закаменский мясокомбинат»), строительных материалов, швейных изделий; обработка камней и др. В связи с закрытием ДВМК существенно изменились характер и интенсивность воздействия на окружающую среду. Основным источником загрязнения стали его отходы.

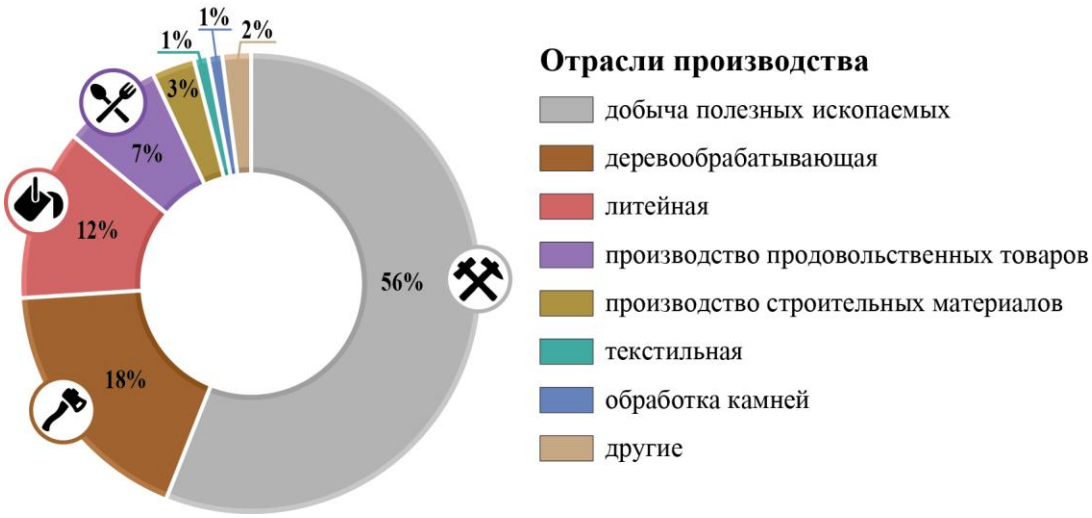


Рис. 6. Структура промышленности Закаменска

В 1999 г. ЗАО «Закаменск» приобрело в собственность хвостохранилища и начало интенсивные работы по определению запасов металлов в техногенных песках и поиску новейших технологий их доизвлечения. В 2007 г. началось строительство фабрики по переработке техногенных песков, которая использует передовые технологии. Разведанных запасов (25-30 млн. т) при производительности фабрики 1,5 млн. т / год хватит на 15-20 лет работы. С 2010 г. ЗАО «Закаменск» приступило к опытной отработке техногенного месторождения вольфрама Барун-Нарын. Отработанные отходы ДВМК складируются в новообразованное в долине р. Зун-Нарын одноименное хвостохранилище (рис. 5 Д). В 2011 г. в рамках ФЦП “Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие байкальской природной территории на 2012-2020 годы” из аварийного хвостохранилища в ходе рекультивации было перемещено 3,5 млн. тонн отходов в верхнюю часть Барун-Нарынского хвостохранилища.

ЗАО «Закаменск» активно ведет также разработку Au, доведя своим показатели в 2006 г. до 300-340 кг. С 2007 г. предприятие занимается добычей W на Инкурском россыпном месторождении. Так, на каждые 500 г Au приходилось 500 кг W в россыпях Гуджирка и Мыргеншено. Помимо этого с 2004 г. был введен в действие деревообрабатывающий завод с объемом переработки древесины 20 тыс.м3 в год. Ассортимент продукции завода: доска цельная, доска сращенная, доска обрезная, евровагонка, брус оконный трехслойный, дверные и оконные блоки, наличники и т.д.

1.3. Физико-географические условия Эрдэнэта

1.3.1. Географическое положение и рельеф

Территория горнопромышленного центра занимает площадь 180 км2 на междуречье Селенги и Орхона в сомоне Баян-Ундэр (Орхонский аймак, Монголия), в 340 км к северо-западу от столицы страны Улан-Батора, в 180 км западнее г. Дархан и в 140 км от государственной границы Российской Федерации (рис. 7) в Орхон-Селенгинском прогибе Селенгино-Витимского вулканического пояса. Этот пояс длиной около 2000 км в виде субширотной дуги протягивается от хребта Тохтоген-Шил в Западной Монголии на западе до южного края Витимского плато на территории России на востоке (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

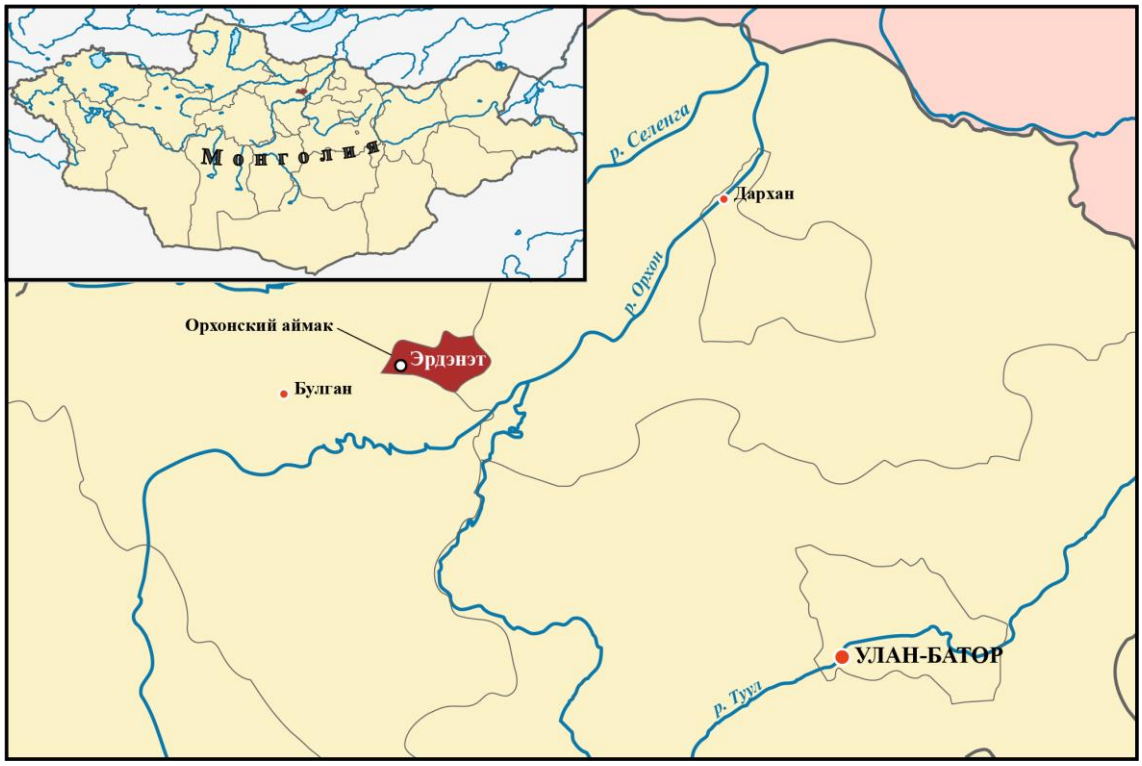


Рис. 7. Картасхема района исследования Эрдэнэта

Территория представляет собой в значительной степени приподнятую и расчлененную горную страну (абсолютные отметки 1000-2150 м), расположенную в зоне сопряжения двух крупнейших хребтов Северной Монголии – Хангай и Хэнтэя. Центральная часть территории приурочена к долине р. Эрдэнэтий-Гол, горные массивы сосредоточены в виде подковы с северо-запада до востока. Основными орографическими элементами являются: на северо-западе и западе – хр. Баян овоо, на юге – Эрдэнэт овоо, на востоке – Хангая, Цагаан Шувуут. Горные сооружения Хангая отделяются от гор Бурэнгийн Нуруу долиной р. Хангая.

1.3.2. Геологические условия

Район исследований, согласно работам Чехословацкой экспедиции (Ваул, 1968; Коминек, 1969), расположен в пределах активизированных в палеозое и мезозое раннекаледон-

ских (позднебайкальских) структур Селенгино-Яблоновой складчатой системы (Тарето-Селенгинское геоантиклинальное поднятие). В тектоническом отношении участок приурочен к ослабленной зоне разломов северо-западной ориентации, определяющих структурное положение рудной зоны в целом, одновременно резко усложненной разломами субмеридионального (север-северо-восточного) и субширотного (восток-северо-восточного) направлений. Складчатым основанием платформы здесь служат древние (v-$Є_1$) дислоцированные породы раннекаледонского геосинклинального цикла, представленные морскими осадочными породами преимущественно карбонатного состава.

В районе широко развиты пермские отложения (*P*) (рис. 8). Среди них выделяют две эффузивные толщи – андезитовые, дацитовые порфиры и их туфы, липаритовые порфириты (кварцевые порфиры) и их туфы, разделенные туфогонно-осадочной толщей туфоконгломератами и туфопесчаниками. С пермской вулканогенной серией в тесной пространственной связи находится селенгинский интрузивный комплекс монцонит-диорит-граносиенитовой формации.

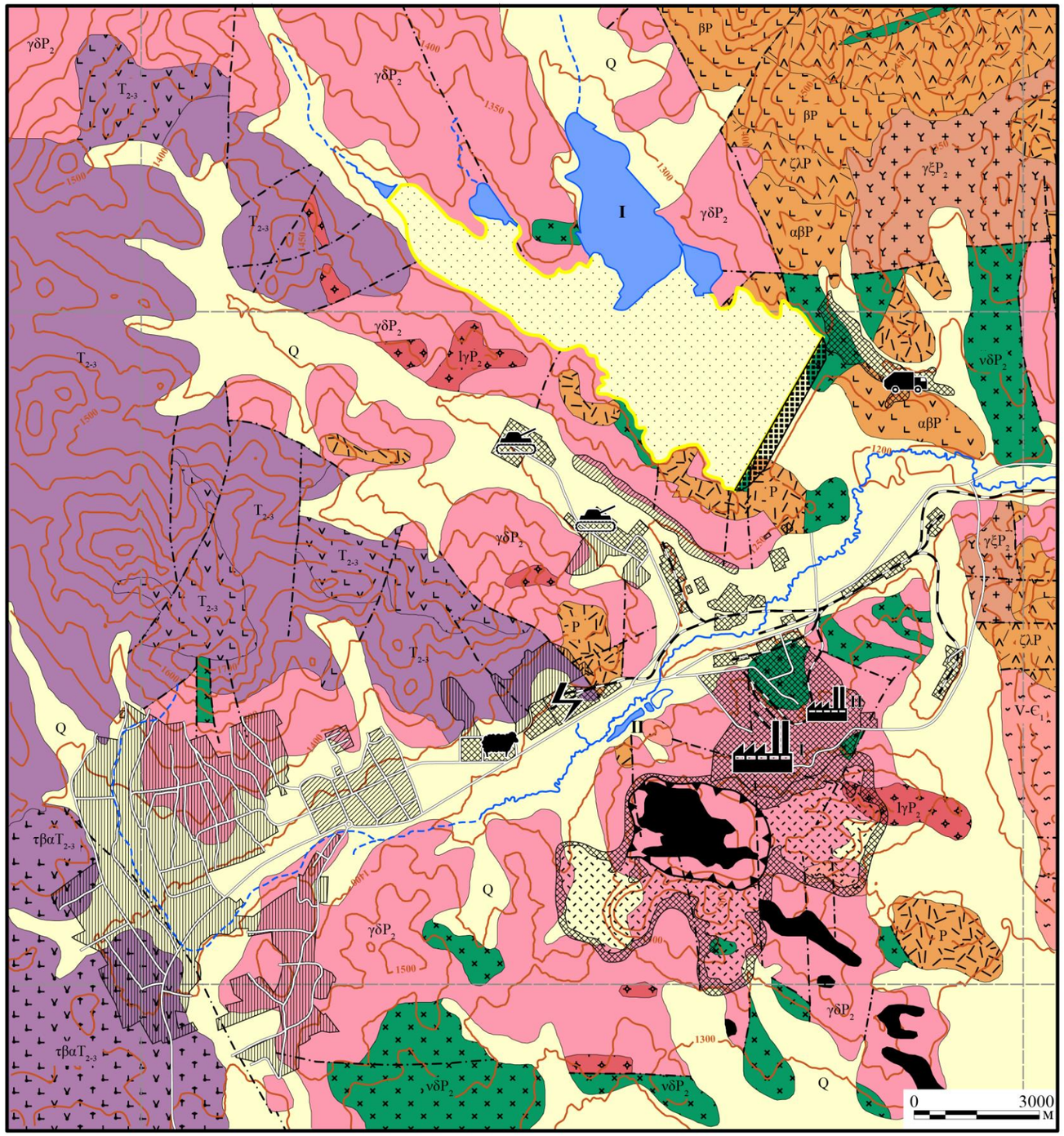
Четвертичные отложения (*Q*) залегают почти сплошным чехлом (рис. 8) на разновозрастных дочетвертичных породах, кроме крутых обрывистых склонов речных долин, хребтов и горных вершин. Среди них выделяются: аллювиальные, пролювиальные, делювиальные и элювиальные.

Горнопромышленный центр расположен на северо-западе рудного поля Эрдэнэтский, представляющего собой узкую поперечную структуру, которая сложена пермскими вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями хануйской серии, пронизанными верхнепермскими гранитоидами селенгинского комплекса. Протяженность его около 100 км, ширина в северной и южной части 50-60 км, в центре около 25 км. В границах города и месторождения Эрдэнэт распространены следующие комплексы пород: амфиболиты, амфибол-биотитовые, биотитовые, кварц- полевошпатовые сланцы, мигматиты, которые встречаются в виде останцов и ксенолитов в гранитоидах, допермские габбро и монцодиориты.

В тектонических приподнятых блоках среди палеозойских и мезокайнозойских образований преимущественно развиты гнейсы, кристаллические сланцы, кварциты, известняки, мрамор, кварцевые порфиры, метаморфические песчаники, амфиболиты и т.д.

Наиболее древняя свита – сланцево-гнейсовая с амфиболитами и известняками – приурочена к междуречью Хангая, Баян Ундура, Хялганта. Выходы докембрийских отложений на дневную поверхность обычно приурочены к ядрам крупных антиклинальных структур, где эти отложения прорваны многочисленными календонскими и герцинскими интрузивными телами.

Также верхнепалеозойские отложения распространены на исследуемом участке, в их составе выделяют 5 свит. Наиболее ранней, сформировавшейся в среднем или верхнем карбоне, является свита кислых эффузивов (туф, туф-лавы, кварцевые порфиры), несогласно залегающей



Условные обозначения

Кайнозойские образования

Четвертичная система

Аллювиальные отложения. Галечники, пески, супеси, суглинки (Q)

Мезозойский образования

Триасовая система

Трахибазальты, трахиандезиты, трахиты ($\tau\beta\alpha T_{2-3}$)

Вулканиты кислого состава (T_{2-3})

Вулканиты основного и среднего состава (T_{2-3})

Палеозойские образования

Пермские вулканогенные и осадочные образования

Базальты и их туфы (βP)

Андезито-базальты (αβP)

Дациты, риолиты и их туфы (ζλP)

Поля вулканитов преимущественно кислого состава, нерасчлененные (P)

Кембрийские образования

Кристаллические сланцы ($V\text{-}Є_1$)

Селенгинский комплекс

Массивные и гнейсовые лекограниты поздней фазы ($l\gamma P_2$)

Граниты, граносиениты ($\gamma\xi P_2$)

Гранитоиды повышенной основности: кварцевые диориты, гранодиориты, монцогранодиориты, граниты, диориты ($\gamma\delta P_2$)

Габброиды и диориты ранней фазы ($\nu\delta P_2$)

Комплекс порфировых интрузий (рудные тела)

Другие условные знаки

Разломы

Городская застройка

Промышленная застройка

Юрточная застройка

Транспортная

Пастбища (не заштрихованные участки)

Объекты промышленной застройки

Промплощадки предприятий: КОО «Эрдэнэтское Предприятие» (I), ООО «Эрдмин» (II)

Озеро Эрдэнэтского хвостохранилища (I) и отстойников ТЭЦ (II)

Отвалы техногенных песков: Эрдэнэсткое хвостохранилище

Дамба Эрдэнэтского хвостохранилища

Отвалы вскрышных пород

Промплощадка ТЭЦ «Эрдэнэт»

Промплощадка «Эрдэнэт Хивс»

Военные части

Городская свалка

Рис. 8. Фрагмент схемы геологического строения Эрдэнэтского района (оцифровано и доработано автором. Составлено С.П. Гавриловой и Д. Оролмаа по материалам В.С. Калинина, Э.Ф. Михайлова, П.Н. Макарова, А.Е. Шабаловского (1972); А.Е. Шабаловского, В.Д. Баянова, В.И. Зарубина и др. (1974); Ю.М. Пестрецова, Ф.Н. Борчалинского, Ю.Н. Фомикова и др. (1981); В.П. Арсентьева, Г.К. Вникеева, Ю.М. Холода и др.)

на отложениях нижнего карбона и имеющей в основании горизонт базальных конгломератов мощностью около 10-15 м и толщу черных пироксеновых порфиритов мощностью 30-50 м.

Из неблагоприятных физико-геологических процессов следует отметить осыпи, обвалы, сейсмогенные сотрясения в горной части, которые приводят к селеподобным выносам крупнообломочного материала. В горной части и на участках распространения увалов по логам идет интенсивный вынос материала периодически действующими водотоками с формированием в устьевых частях конусов выноса. Местами наблюдаются интенсивные эрозионные врезы, которые приводят к образованию мелких узких террасок в долинах этих логов, а также небольших водопадов в руслах высотой 0,5-1,5 м.

1.3.3. Климатические условия

Исследуемый участок располагается в зоне резко континентального климата (Береснева, 2006), обусловленного значительной удаленностью от морей и океанов и защищенностью горными хребтами. Здесь характерны большие амплитуды суточных и годовых температур воздуха, резкая смена сезонов, значительная сухость воздуха, малое количество атмосферных осадков и холодная, длительная зима. Климатические условия района охарактеризованы на основе многолетних наблюдений гидрометеорологической станции в г. Булган.

Среднегодовая температура воздуха составляет -1,2 ºС. Наиболее холодный месяц январь, среднемесячная температура которого колеблется от -15 до -25 °С, абсолютный минимум для данной территории равен -44 °С (рис. 9 А). Толщина снегового покрова редко превышает 10 см. При значительном понижении температуры воздуха и небольших высотах снежного покрова наблюдается наибольшая глубина промерзания от 240 см в суглинистых и глинистых почвах до 430 см в крупнообломочных грунтах (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001). Безморозный период наступает в первой декаде апреля и заканчивается первой декадой октября, его средняя продолжительность 180 дней. Наиболее теплый месяц июль, среднемесячная температура достигает значений +15 – +21 °С. Абсолютный максимум наблюдается в июне (+ 36 °С).

По количеству осадков территория относится к зоне недостаточного увлажнения, однако район расположен в одной из наиболее увлажненных областей страны, чему способствует доступность широких долин рр. Селенги и Орхона влагоносным воздушным массам. Среднегодовое количество осадков колеблется от 200 до 350 мм (рис. 9 А), достигая в отдельных годы 600 мм. Основная масса осадков 60-70% выпадает летом, преимущественно в июле и первые 3 недели августа, имея ливневой характер, иногда за сутки выпадает до 30-50 мм (рис. 9 А). Минимальное количество осадков наблюдается в зимние месяцы (январь, февраль) – менее 10 мм.

Направление ветра в приземном слое атмосферы определяется главным образом орографическими особенностями рельефа. В холодный сезон (с октября по апрель), преобладают ветры северо-западной и северной составляющих (39 и 22 % соответственно), а в теплый (май-

сентябрь), помимо перечисленных (25 и 23) добавляется влияние южных и юго-восточных ветров (16 и 11) (рис. 9 Б). Особенностью ветрового режима является незначительная повторяемость ветров южных и восточных направлений в течении всего года, что определяется преобладающим влиянием долины р. Эрдэнэтий-Гол на ветровой режим. При строительстве и проектировании инфраструктуры города учитывалась роза ветров: так, вся промышленная зона, включающая ГОК, ТЭЦ, ковровый завод, хвостохранилище, свалку и т.д., располагается на востоке города, а селитебная зона – на западе и северо-западе. Наиболее тихая погода наблюдается в июле и в августе, повторяемость штилей в эти месяцы достигает 47%. В целом ветер отличается невысокими скоростями (1,8–5,0 м/с). Наибольшая зарегистрированная скорость ветра, равная 14 м/с, при порывах до 18 м/с, наблюдалась в апреле 1973 г.

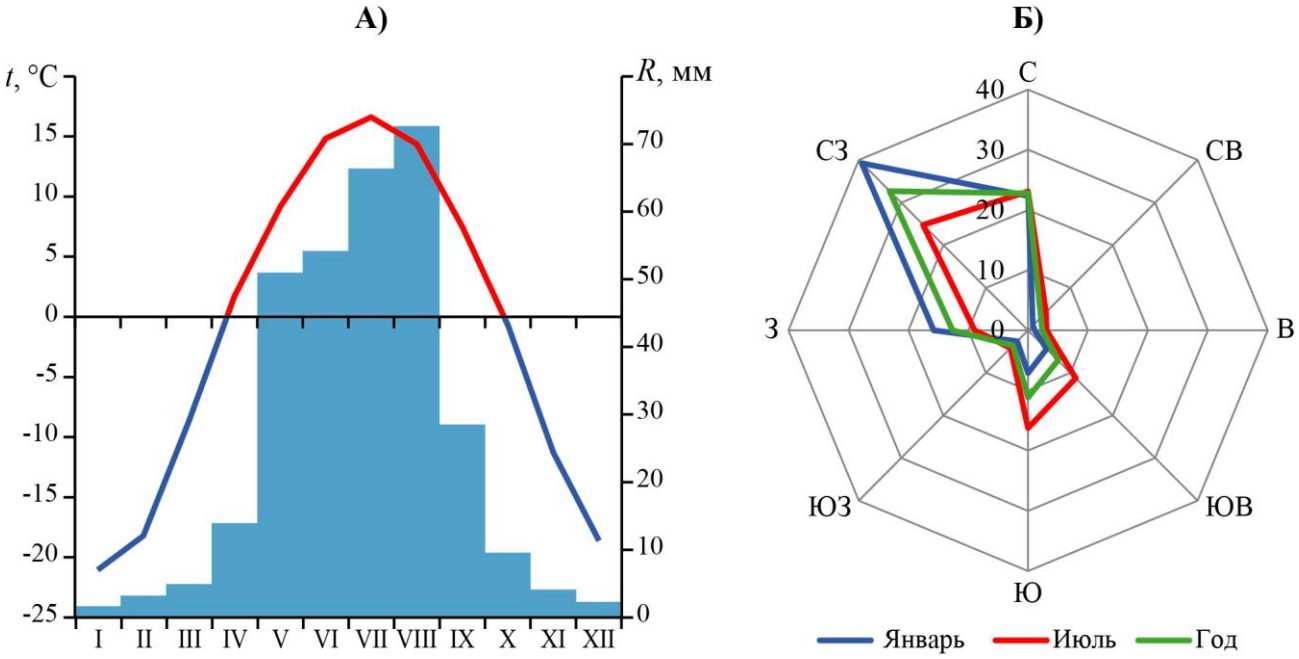


Рис. 9. Метеорологические показатели по данным метеостанции Булган (составлено по The Global Historical Climatology Network-Monthly и Королевского нидерландского метеорологического института (KNMI, 2016)): А) – годовой ход среднемесячных температур (*t*) и осадков (*R*) за 1941-2016 гг.; Б) – роза ветров за 2005-2016 гг.

На территории горнопромышленного центра встречаются многолетние мерзлые породы в виде островов. Они приурочены к замкнутым межгорным котловинам, участкам развития глинистых пород, слабо обогреваемым залесенным склонам речных долин и озерных котловин северной и северо-западной экспозиции. Сохранению мерзлой зоны на таких участках способствуют короткое, прохладное лето и продолжительная, холодная, малоснежная зима, вследствие чего снежный покров здесь не может существенно влиять на тепловой режим поверхности земли. Признаки промерзания в основном отмечаются в четвертичных аллювиальных, озерно-аллювиальных, песчано-глинистых отложениях, слабо метаморфизованных породах мезакайнозоя, а также очень редко в скальных образованиях палеозоя. В период с 1996 по 2003 г. в Эрдэнэте выявлены острова многолетних мерзлых пород в пойме р. Эрдэнэтий-Гол и на забо-

лоченных участках на глубине 2,5-4,5 м, продолжающиеся до глубины 8-17 м (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001).

1.3.4. Почвенный покров

Район исследования располагается в Хангайской провинции, средне-горно-таежном Хануй-Орхонском округе (Белозерцева и др., 2005; Доржготов, Батхишиг, 2009), в зоне темно-каштановых почв среднегорья и континентального содонакопления. Основным источником соды служат грунтовые и поверхностные воды, поступающие с обрамляющих горных массивов, солевой состав которых формируется в результате выветривания и выщелачивания горных пород, главным образом, вулканогенных, в результате чего образуются карбонаты и бикарбонаты щелочей.

Первым специалистом, исследовавшим почвенный покров и его особенности в пределах Монголии, был Л.И. Прасолов, который в составе экспедиции Переселенческого управления проводил работы в районах Центральной Азии (1908-1914 гг.). Им было установлено широкое распространение черноземных и каштановых почв. В опубликованных работах достаточно подробно рассмотрены природные особенности почв и процессов, протекающих в них, а также их районирование (Белозерцева и др., 2005; Беспалов, 1951; Герасимов, Лавренко, 1952; Герасимов, Ногина, 1984; Доржготов, 1973; Доржготов, Батхишиг, 2009; Максимович, 1974; Ногина, 1978; Панкова, 1964).

На преобладающем элементе рельефа – пологоволнистой равнине – естественными почвами являются темно-каштановые мощные слабозасоленные солонцеватые и глубокосолонцеватые (чаще встречаются на широких делювиальных склонах восточной экспозиции) и темно-каштановые слабозасоленные несолонцеватые (Карпель и др., 1975). Первая характеризуются более плотным сложением нижней части гумусового горизонта, что обусловлено обогащением ее коллоидными частицами. Профиль почв представлен следующими генетическими горизонтами: A-B1-B2-BCCa-CCa.

По гранулометрическому составу почвы тяжелосуглинистые и суглинистые, безгипсовые и карбонатные. Засоление в основном карбонатно-натриевого типа, содержание бикарбонатов щелочей в поверхностных горизонтах для данного района составляет 1,6-2,0 мг/экв, на глубинах 0,5-1,0 м фиксируется сода. В солонцеватых почвах отмечается высокое содержание поглощенного Na как в поверхностных (0-30 см) – 17-20%, так и в нижележащих (60-100 см) – до 30%. Эти почвы, особенно солонцеватые, отличаются неблагоприятными водно-физическими свойствами, коэффициент фильтрации в верхних горизонтах 0,5-0,2 м/сут, в нижележащих – 0,14-0,07 м/сут (Карпель и др., 1975; Строганова, 2008).

На плоских водоразделах развиты комплексы маломощных (мощность мелкоземистого слоя от 0,3 до 0,6 м) и слаборазвитых (мощность от 0,1 до 0,3 м) почв темно-каштанового типа.

В долине р. Эрдэнэтий-Гол в виде узкой полосы встречаются лугово-каштановые и луговые слабозасоленные суглинистые почвы сульфатно-натриевого типа. В нижних горизонтах (h=100-150 см) может встречаться сода, а в верхних отмечается наличие сульфатов. Морфологическое строение представлено следующими горизонтами: A-Bt-BCa-C.

Почвы содержат 6-8% гумуса, количество которого постепенно уменьшается с глубиной, в составе преобладают гуминовые кислоты. Емкость поглощения равна 25-30 мг-экв на 100 г почвы с постепенным уменьшением к материнской породе. Реакция среды меняется от нейтральной к щелочной вниз по профилю.

В районе исследований также встречаются горные черноземы и темно-бурые лесные почвы, слаборазвитые, маломощные, реже среднемощные разности, распространенные в условиях резкорасчлененного рельефа среднегорья, на склонах с абсолютными отметками 1600-1700 м юго-юго-западной экспозиции и 1400-1600 м восточно-северо-восточной экспозиции. Почвы плодородные, незасоленные и не солонцеватые (Карпель и др., 1975)

1.3.5. Растительный покров

Исследуемая территория располагается в Евразиатской степной области, Хангайской горно-лесостепной провинции, Селенгинском горно-лесном округе (Юнатов, 1950), где достаточно подробно исследована вертикальная поясность растительного покрова (Банникова, 2003; Гунин и др., 2005; Карамышева, Банзрагч, 1976; Карамышева, Банзрагч, 1977; Горная лесостепь Восточного Хангая (МНР), 1983) и особенности степных ландшафтов (Королюк, 2002; Лавренко, Карамышева, Никулина, 1991; Lavrenko, Karamysheva, 1993).

Рельеф характеризуется мягкими очертаниями с уплощенными вершинами, которые облесены преимущественно по склонам северной экспозиции. Долины довольно хорошо разработаны и остепнены.

Лиственичные леса с хорошо развитым травяным покровом (*Lariceta Herbosa*) приурочены исключительно к северным склонам, занимают лощины и вогнутые склоны, почти никогда не поселяясь на взлобках и бровках склонов. Древостой никогда не достигает значительной полноты, чаще всего не превышает 0,4-0,5. Основная древесная порода лиственница сибирская (*Larix Sibirica Ledeb*.), имеющая высоту 15-20 м. Ближе к опушкам на нижней границе леса можно найти примесь осины обыкновенной (*Populus tremula L.*) и березы Ипполита (*Betula hippolyti Sukaczev*).

Подлесок неразвит, лишь изредка встречается ива пятитычинковая (*Salix pentandra L.*) и ива илийская (*Salix depressa L.*). Кустарниковый ярус развит очень слабо и представлен пятилистником кустарниковым (*Pentaphylloides fruticosa*), шиповником иглистым (*Rosa acicularis Lindl.*), спиреей средней (*Spiraea media F.Schmidt*) и спиреей извилистой (*Spiraea flexuosa Fisch*). В травянистом ярусе, который благодаря осветленности леса, хорошо развит, преобладают зла-

ки и осоки: вейник Лангсдорфа (*Calamagrostis langsdorffii Trin*), вейник тупоколосковый (*Calamagrostis obtusata Trin.*), овсяница овечья (*Festuca ovina L.*), овсяница красная (*Festuca rubra L.*), мятлик сибирский (*Poa sibirica Roshev*), пырейник смешиваемый (*Elymus confusus (Roshev.) Tzvel.*), осока стоповидная (*Carex pediformis C.A. Mey*), осока амгунская (*Carex amgunensis F. Schmidt*).

Горные степени занимают южные склоны гор и спускаются в долины рек. Их видовой состав достаточно пестрый: овсяница овечья (*Festuca ovina L.*) и житняк гребенчатый (*Agropyron cristatum (L.) Gaertn.*). По днищам сухих долин степи принимают характер луговых и здесь появляются куртины пятилистника кустарникового (*Pentaphylloides fruticosa*).

По обширным межгорным равнинам располагаются участки сухих степей с ковылем-волосатиком (*Stipa capillata L.*): пижмово-ковыльные (*Tanacetum sibiricum*) и ковыльно-лапчатковые (*Potentilla acaulis*). Межгорные долины по днищам заболочены и здесь встречаются злаковые и злаково-осоковые луга с единичными низкорослыми ивами.

1.3.6. Поверхностные воды

Основной водной артерией северной Монголии является Селенга и ее крупнейший приток Орхон длиной около 1130 км, она является самой длинной рекой Монголии. Их бассейны разделяются простирающимися с юго-запада на северо-восток горными хребтами Булган-хан, Булган-Нуру и Бурин-Нуру, образующими Главный водораздел (рис. 10). Город Эрдэнэт располагается в верхней части бассейна р. Хангал, являющейся притоком первого порядка р. Орхон и состоящей из рр. Эрдэнэтий-Гол и Зуна-Гол. Ширина речной долины изменяется от нескольких сот метров до 1-2 км. Наиболее расширенные участки приурочены к устьям боковых долин, а сужения – к местам пересечения с отрогами водораздельных хребтов. Горные образования, окаймляющие речную долину, денудированы и характеризуются плоскими вершинами и мягкими очертаниями склонов.

Режиму рек территории Эрдэнэта присущ ряд особенностей: во-первых – скованность льдом примерно в течение полугода, во-вторых – тесная зависимость режима рек от режима атмосферных осадков, в-третьих – сильные колебания скоростей течения рек из-за неравномерного выпадения осадков, в-четвертых – значительная эрозионная деятельность и отсутствие на эрозионных участках современных аккумулятивных накоплений в связи с крутым продольным профилем на большей части их течения.

Эрдэнэтий-Гол. Река, в долине которой располагается Эрдэнэт, на протяжении половины города представляет собой пересохшее русло в летний период и лишь в районе ТЭЦ появляется течение в результате выхода подземных вод. Начало река берет в 7,5 км к западу от горы Эрдэнэтий-Обо, на высоте 1320 м, длина до устья – 17,6 км. Долина имеет плоскую корытообразную форму, с шириной по дну от 100 до 300 м, покрытую луговой растительностью и ме-

стами заболоченную. Русло извилистое, шириной от 1 в верховьях до 3-4 м в среднем течении и врезано в слабо водопроницаемые глинистые грунты, за исключением небольшого участка в городе, где русло прорезает гравийные отложения (Смирнов и др., 1976). В 2 км от устья р. Эрдэнэтий-Гол слева в нее впадает р. Гавелин, длина которой составляет 15,5 км, а площадь водосбора 61 км^2.

Мутность воды до начала строительства ГОКа по состоянию на 1974 г. (Анисимова и др., 1975) изменялась от 20-50 до 34 000 г/м^3. Наибольшие значения отмечены в первой половине теплого периода, что связано не столько с весенним половодьем, сколько с разрушением берегов реки в период оттаивания промерзающих почво-грунтов. Вода по химическому составу относится к гидрокарбонатно-кальциево-натриевой с несколько повышенной минерализацией (640-580 мг/л), жесткая (Анисимова и др., 1975).

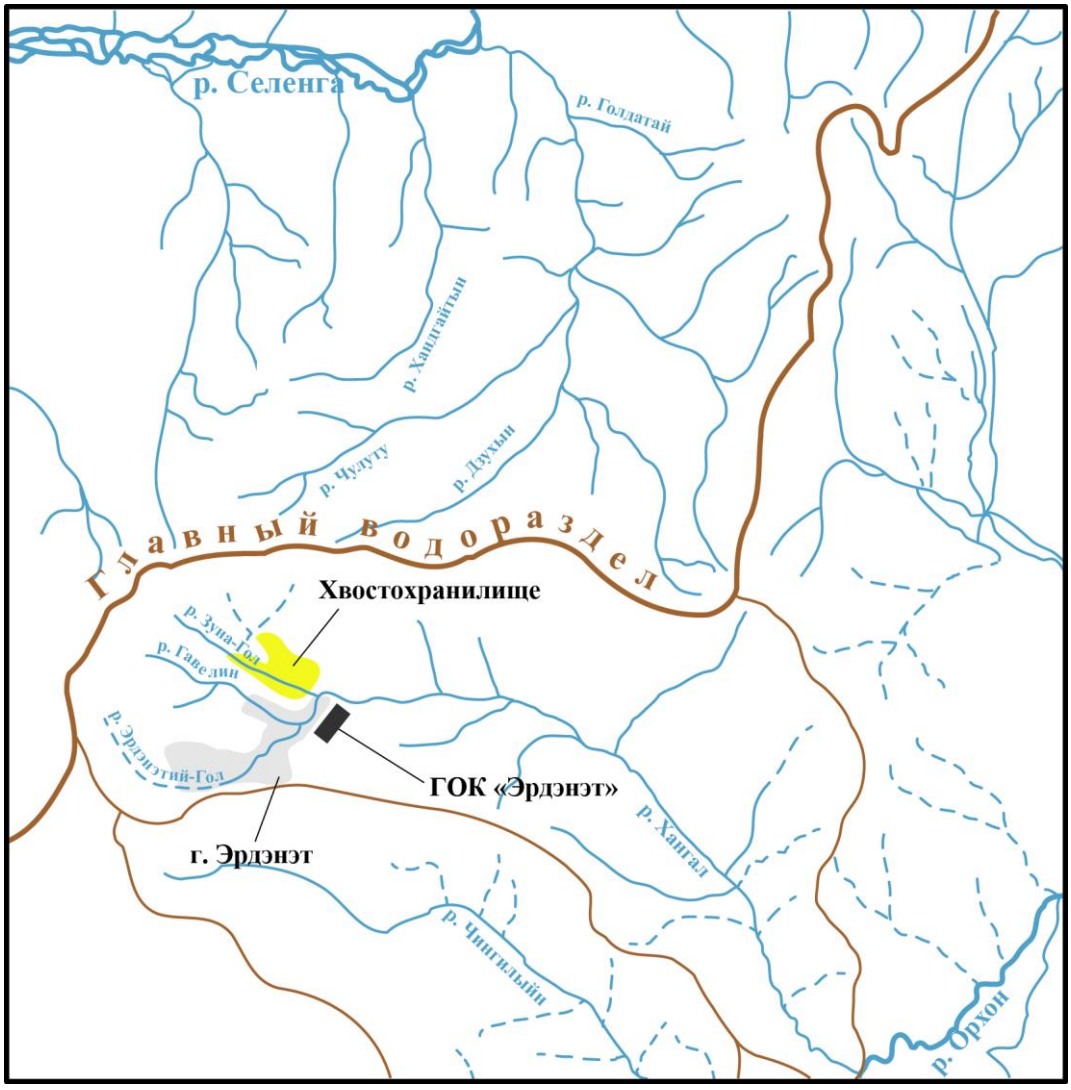


Рис. 10. Гидрографическая схема района Эрдэнэт

Зуна-Гол. Является второй составляющей р. Хангал. Имеет длину 14,3 км и площадь водосбора 88,3 км^2 (Смирнов и др., 1976). Долина реки также имеет корытообразную форму и плоское дно, которое в устьевой части достигает ширины 400-500 м, однако на сегодняшний

день эта территория превращена в хвостохранилище, и природные воды реки можно наблюдать лишь в верховье. В устьевой области была построена плотина, через которую просачиваются в р. Эрдэнэтий-Гол воды предприятия, загрязненные Cu, Mo, Ag, Se, Re, U, Th, Mg, Pb, Zn, Sb, Mo, Se, As, Bi, и др. (Бямба, 2007).

Мутность воды, а также сток взвешенных наносов р. Зуна формируется в условиях малой водности, вследствие ее расход взвешенных наносов невелик: норма стока взвешенных наносов оценивается величиной 1550 т/год (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001).

1.4. Техногенное воздействие в Эрдэнэте

1.4.1. Характеристика месторождения

Эрдэнэтское месторождение расположено на северо-западе рудного поля, на правом берегу р. Эрдэнэтийн-Гол. По особенностям распределения фанеритовых пород, вмещающих порфировый комплекс и оруденение, можно выделить два блока – юго-западный и северо-восточный (Соготинский) (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Первый сложен гранодиоритами, среди которых встречаются останцы габбро, диоритов, а также жиловидные тела и небольшие штоки лейкогранитов. Второй отличается широким развитием гибридных пород, в том числе повышенной щелочности; здесь распространены диориты, монцодиориты, мезокартовые кварцевые монцодиориты, граносиениты, гародиориты с останцами и ксенолитами габбро, монцогаббро и метаморфических пород. Породы обоих блоков имеют халькофильную геохимическую специализацию (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Молибден-медное оруденение связано с гидротермально-метосоматической переработкой гранодиоритов и порфиров с образованием рудного штокверка. Размер ореола гидротермально измененных пород и рудного штокверка 2,7 х 1,75-2,2 км (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Анализ распределения Cu в трехмерной блоковой модели (Берзина, Борисенко, 2008) показывает, что ее среднее содержание с глубиной и по краям штокверка снижается. Вблизи поверхности оно достигает более 1 %, а на краях уменьшается до 0,1-0,2 %. Максимальные концентрации (8309 г/т) выявлены в порфировидных гранодиоритах, а минимальные (1300-1400) – риодацитах и андезитах (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010)

Mo характеризуется достаточно равномерным распределением (50-150 г/т) в трехмерной блоковой модели (Малютин и др., 2007). Отмечаются отдельные участки с повышенным содержанием (более 250 г/т), в основном в середине штокверка и в его юго-восточной части. С глубиной содержание Mo меняется мало, в основном уменьшаются области с повышенным содержанием, тем не менее на глубине 600 м и ниже фиксируются области с концентрациями более 250 г/т, иногда достигая до 1000 г/т (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Руда состоит из халькозина (Cu_2S), ковеллина (CuS), халькопирита ($CuFeS_2$), молибдени-

та (MoS_2), брошантита (Cu_4SO_4 $(OH)_6$), азурита ($Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$) и др. (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Всего за время работы с 1976 г. на руднике было добыто около 440 млн. $м^3$ горной массы (EMC, 2013).

1.4.2. Горно-обогатительный комбинат «Эрдэнэт»

Градообразующим предприятием с 1978 г. по настоящее время является КОО «Предприятие Эрдэнэт» (рис. 11 А), одно из крупнейших в Азии по обогащению и добыче Cu и Mo концентрата. Оно производит около 530 тыс. т Cu и 4,5 тыс. т Mo концентрата (EMC, 2013). Добыча ведется открытым способом, длина рудника составляет 2800 м, ширина 1600 м, высота каждого уступа 15 м (рис. 11 Б). По состоянию на 2011-2012 гг. массовые взрывные работы ведутся систематически раз в неделю. Единовременно взрывается 200-400 тыс. $м^3$ горной массы с использованием водоустойчивого эмульсионного взрывчатого вещества (Бямба, 2007). Отвалы вскрышных пород располагаются вокруг карьера (рис. 11 В). Породы Эрдэнэтского месторождения, которое относится к молибден-медно-порфировому типу, где помимо Cu и Mo, выявлены промышленные концентрации Ag, также содержат ТММ I-III классов опасности – U, Th, Mg, Pb, Zn, Sb, Mo, Se, As, Bi, и др. (Бямба, 2007; Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Обогатительная фабрика (рис. 11 А) – основной производственный цех с технологической схемой, обеспечивающей дробление руды, измельчение, флотацию, фильтрацию, сушку и отгрузку товарных Cu и Mo концентратов (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001). Рудоподготовка осуществляется двумя линиями: первая, производительностью 20,5 млн. т руды в год, предусматривает трехстадиальное дробление, в результате чего 65% измельченной руды достигают класса 0,074 мм; вторая, с производительностью 5 млн. т руды в год, имеет только одну стадию дробления, и в результате также 65% измельченной руды достигают класса 0,074.

Следующий этап – флотация руды, проходящая в трехстадиальном режиме: это дважды коллективное обогащение Cu и Mo и отдельное обогащение последнего. На первой стадии из измельченной руды получают концентрат с 16-19% содержанием Cu-Mo-пирита (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001), который передают на второй этап, где получают Cu-Mo концентрат с содержанием Cu 23-23,5%, и в заключительной стадии проводят обогащение Mo. Всего за день производится 2000 т Cu-Mo концентрата. После обогатительного процесса пульпа (рис. 11 Г) перекачивается насосом и накапливается в хвостохранилище (рис. 11 Д) площадью более 1500 га, образованное в долине р. Зуна-Гол путем строительства плотины, достигшей по состоянию на 2011 г. высоты 85 м (рис. 11 Е). На поверхности хвостохранилища отсутствует растительность, поэтому оно подвержено активным эоловым процессам (рис. 11 Ж).

Частью КОО «Предприятия Эрдэнэт» является ремонтно-механический завод, проводящий текущие и капитальные ремонты технологического оборудования предприятия, восстановительный ремонт изношенных запчастей, изготовление металлоконструкций, плавку стали,

чугуна, цветных металлов и литье запчастей. Деятельность его началась с 1978 г. и на сегодня имеет проектную мощность в 2882 т запчастей с механической обработкой в год, 2640 т металлоконструкций, 200 т нестандартных запчастей, 6600 т литейных продукций.

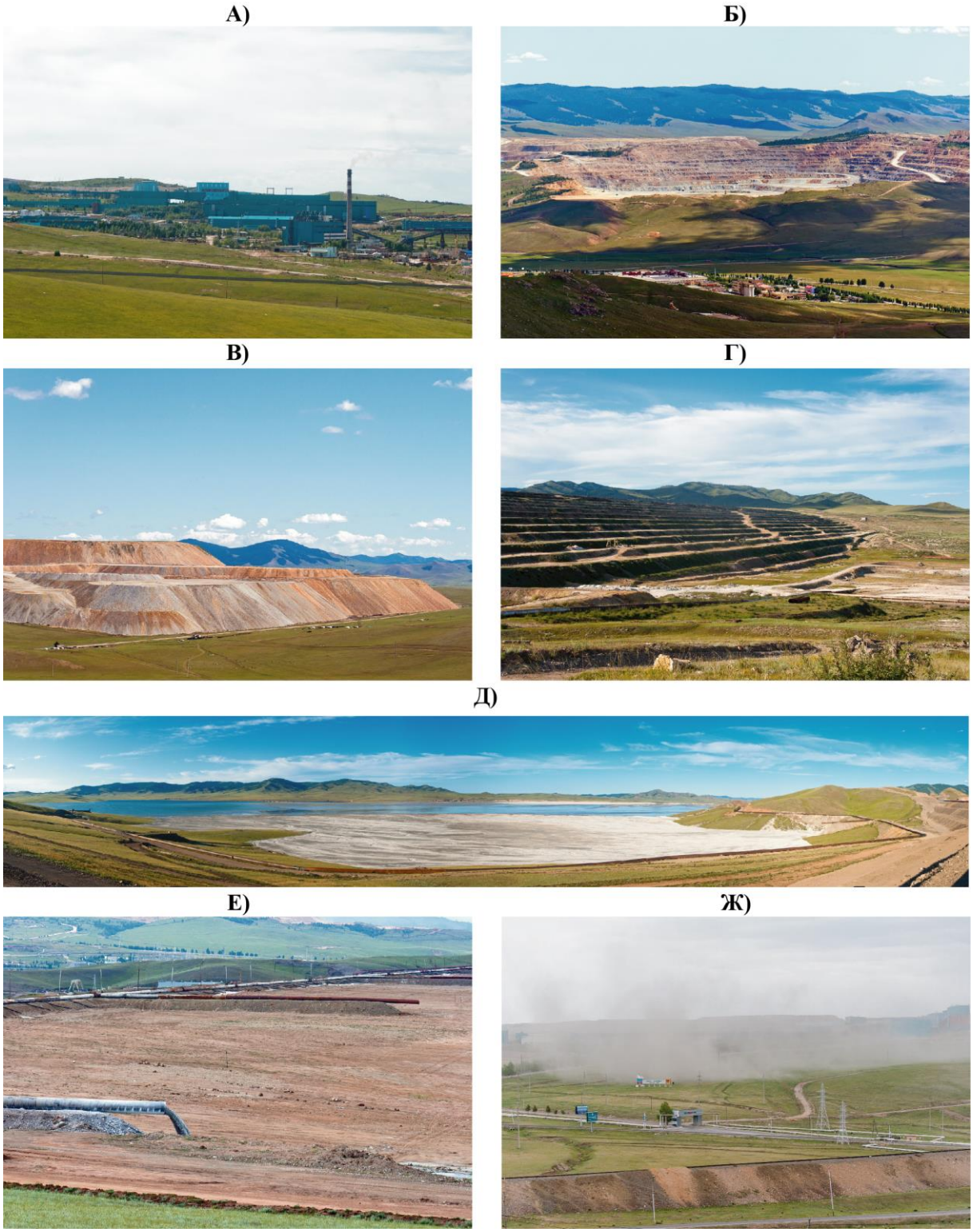


Рис. 11. Техногенные объекты в Эрдэнэте по состоянию на 2011-2012 гг.: обогатительная фабрика ГОК «Эрдэнэт» (А), карьер (Б), отвалы вскрышных пород (В), плотина (Г), хвостохранилище (Д); процесс сброса хвостов с верхней части плотины (Е). Современные экзогенные процессы: эоловый перенос (Ж).

1.4.3. Другие промышленные предприятия города

На территории градообразующего предприятия располагается КОО «Эрдмин», организованная по инициативе бывшего директора предприятия Ш. Отгонбилэг совместно с американской компанией “RCM”, целью которой является выпуск чистой катодной Cu (3600 тонн / год), из забалансовых и складских рудных отвалов, используя раствор серной кислоты.

Между горнопромышленной и селитебной зонами находится построенная в 1988 г. Эрдэнэтская ТЭЦ, использующая бурый уголь из двух разрезов – Шарынгол и Баганур, который, как и большинство сернистых углей обогащен халькофильными элементами. При его сжигании помимо углекислого газа и водяного пара образуются и рассеиваются в атмосфере такие вредные вещества, как оксиды серы, азота, углерода, соединения ТМ, сажа, несгоревшие частицы угля, бенз(а)пирен и др.

Одно из крупнейших предприятий Монголии, также располагающееся в городе, – компания «Эрдэнэт Хивс», основанная в 1981 г., является лидером по производству шерстяных ковров и ковровых изделий машинной работы. Согласно официальному сайту (Erdenet Carpet, 2015) компания владеет несколькими производственными подразделениями, включая фабрику первичной обработки шерсти с мощностью переработки 8000 т мытой шерсти в год; прядильную фабрику, вырабатывающую до 2000 т шерстяной пряжи в год; ткацкую фабрику, которая производит 1200-1500 тыс. $м^2$ в год ковров и ковровых покрытий. Помимо основных трех фабрик, были введены в эксплуатацию швейный и ткацкий цеха “Угалз” и “Нэхмэл” по производству изделий из овечьей, верблюжьей шерсти, кашемира и войлока. С недавнего времени эти цеха были объединены и на их основе создана дочерняя компания “Erdenet cashmere”, производящая большой ассортимент продукции.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

2.1. Полевые работы и полученные данные

Почвенно-геохимическая съемка Эрдэнэта (рис. 12) проводилась летом 2010-2012 гг. в составе Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и АН Монголии, а Закаменска (рис. 13) – 2012-2013 гг. совместно с сотрудниками Байкальского института природопользования СО РАН. Смешанные пробы (Закаменск – 132, включая 27 фоновых; Эрдэнэт – 226, включая 32 фоновых) отбирались методом конверта (цепочки) в 3 повторностях на расстоянии 5-7 м друг от друга из поверхностного (0-10 см) горизонта по сетке с шагом 500-700 м. Это обеспечило пространственную детализацию, необходимую для составления крупномасштабных геохимических карт. Количество и местоположение точек опробования определялось с учетом геологической неоднородности территории.

Для изучения латеральной и радиальной миграции ТММ в районе Закаменска было заложено 7 катен и 31 почвенный разрез (рис. 13) через долину р. Модонкуль на расстоянии 0,5-1,5 км друг от друга: I – через завод «Литейщик» и ТЭЦ, II и III – через Джидинское и Барун-Нарынское хвостохранилища, соответственно; IV – в среднем течении р. Модонкуль ниже Барун-Нарынского и аварийного хвостохранилищ; V-VII – на левом берегу р. Модонкуль через природно-рекреационную и селитебную зоны и техногенное Модонкульское месторождение. Фоновая катена (VIII) заложена в долине пересыхающей в летний период р. Зимки, расположенной в тех же геологических условиях, что и территория горнопромышленного центра. В районе Эрдэнэта заложено 6 катен и 18 разрезов (рис. 12): I – от ГОК «Эрдэнэт» по правому берегу р. Эрдэнэтий-Гол; II – на левом берегу р. Эрдэнэтий-Гол; III и IV – на левом и правом бортах хвостохранилища; V – на левом берегу р. Гавелин; VI – фоновая, в верховье р. Зуна-Гол.

Почвенные разрезы закладывались в четырех ландшафтно-геохимических позициях: автономной (А) – вершины холмов с глубоким залеганием грунтовых вод и поступлением вещества из атмосферы; трансэлювиальной (ТЭ) – склоны долин рек; трансаккумулятивной (ТА) – нижние части склонов; супераквальной (СА) – участки средней и высокой поймы рр. Джида, Модонкуль, Зимка, Эрдэнэтий-Гол, Гавелин. Геохимические ландшафты выделены путем анализа цифровой модели рельефа исследуемых территорий (Хайбрахманов, Тимофеев, Кошелева, 2015). Образцы (106 в Закаменск; 57 в Эрдэнэт) отбирались по генетическим горизонтам.

Для изучения биогеохимических особенностей горнопромышленных центров в разных функциональных зонах отбирались пробы растительного материала ценозообразующих древесных пород: ассимилирующие (хвоя, листья) и многолетние (кора) органы березы плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukaczev*) и лиственницы сибирской (*Lárix sibírica Ledeb.*) в Закаменске летом 2013 г.; ассимилирующие органы гибридных тополей (*Populus*), которые

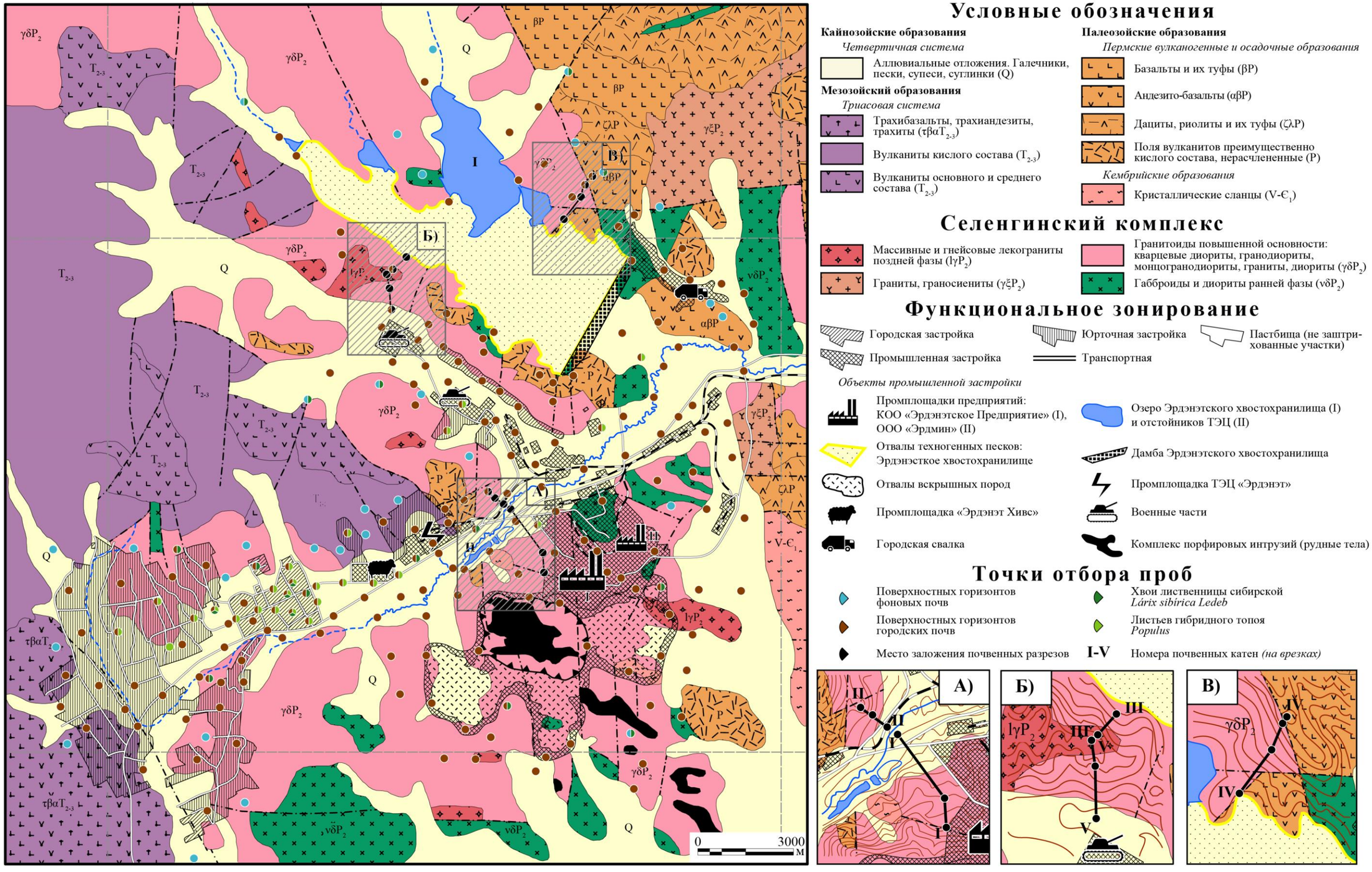
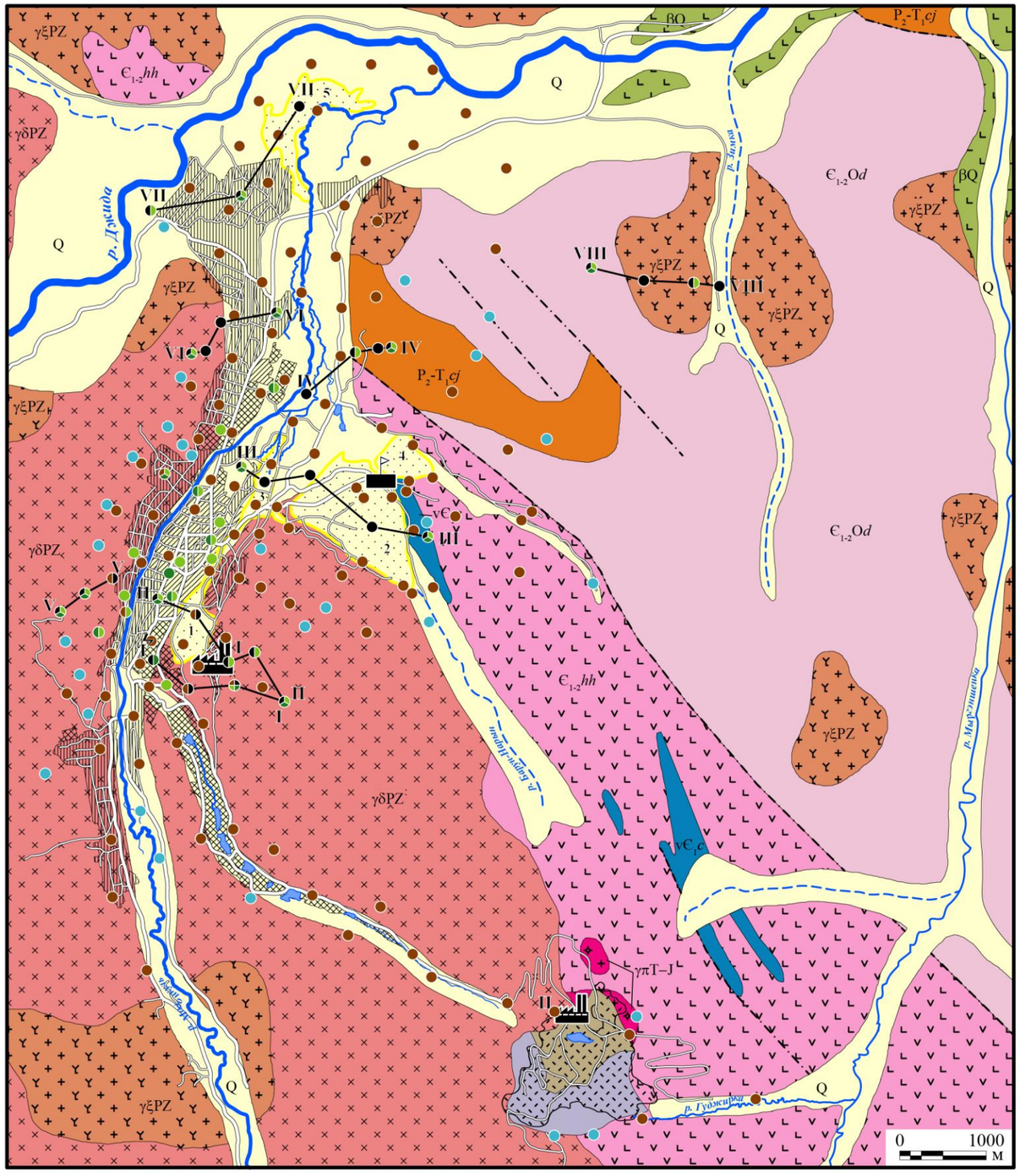


Рис. 12. Карта фактического материала Эрдэнэта



Условные обозначения

Кайнозойские образования

Четвертичная система

Аллювиальные отложения. Галечники, пески, супеси, суглинки (Q)

Оливиновые долинные базальты (βQ)

Мезозойские образования

Гуджирский комплекс. Лейкократовые граниты, гранит-порфиры (γπT-J)

Нерасчлененный палеозойско-мезозойский комплекс

Черноярковская свита. Ортофиры, кератофиры, туфы, туфолавы (P_2-T_1cj)

Палеозойские образования

Кембрийская система

Джидинская свита. Песчаники, алевролиты и известняки ($Є_3$-Od)

Хохюртовская свита. Основные и средние вулканиты, известняки и метасланцы ($Є_{1-2}hh$)

Джидинский комплекс

Вторая фаза. Граниты, граносиениты, сиениты (γξPZ)

Первая фаза. Плагиограниты гранодиориты, диориты (γδPZ)

Цакирский комплекс. Серпентиниты по дунитам и перидотитам ($vЄ_1c$)

Функциональное зонирование

Городская застройка

Промышленная застройка

Дачная застройка

Транспортная

Природно-рекреационная (не заштрихованные участки)

Объекты промышленной застройки

Промплощадки Джидинского W-Mo комбината: фабрика первичного дробления (I), флото-гравитационного обогащения (II)

Отвалы техногенных песков: Джидинское (1), Барун-Нарынское (2), аварийное (3),Зун-Нарынское (4) хвостохранилища; Модонкульское техногенное месторождение (5)

Обогатительная фабрика ЗАО «Закаменск»

Отвалы вскрышных пород

Промплощадка ТЭЦ Закаменск

Карьеры Первомайского (Mo) и Инкурского (W) рудников

Точки отбора проб

Поверхностных горизонтов фоновых почв

Поверхностных горизонтов городских почв

Место заложения почвенных разрезов

Хвои и коры лиственницы сибирской *Lárix sibírica Ledeb*

Листьев и коры березы плосколистной *Bétula platyphýlla Sukaczev*

I-VIII Номера почвенных катен

Рис. 13. Карта фактического материала Закаменска

составляют около 75 % городских насаждений, и лиственницы сибирской (*Lárix sibírica Ledeb.*) в Эрдэнэте летом 2011 г. Опробовались деревья примерно одинакового возраста в фазу вегетации после цветения, после пятидневного бездождного периода. Каждый образец представляет собой смешанную пробу с трех и более деревьев. В Закаменске всего собрано по 32 образца листьев и коры березы и по 21 – хвои и коры лиственницы, а в Эрдэнете – 29 проб листьев тополя и 20 – хвои лиственницы.

2.2. Лабораторные работы

Пробоподготовка. Почвенные образцы массой 0,4-0,5 кг высушивали при комнатной температуре, отбирали и удаляли крупные включения и видимые остатки растений. Для определения актуальной кислотности и содержания гумуса имеющуюся пробу вручную измельчали фарфоровым пестиком в фарфоровой ступке и просеивали через сито с отверстиями диаметром 1 и 0,25 мм (рис. 14); для гранулометрического состава – резиновым пестиком в фарфоровой ступке. Для анализа ТММ масс-спектральным (ICP-MS) и атомно-эмиссионным (ICP-AES) методами с индуктивно-связанной плазмой ручное измельчение проводилось агатовым пестиком в агатовой ступке до состояния пудры.

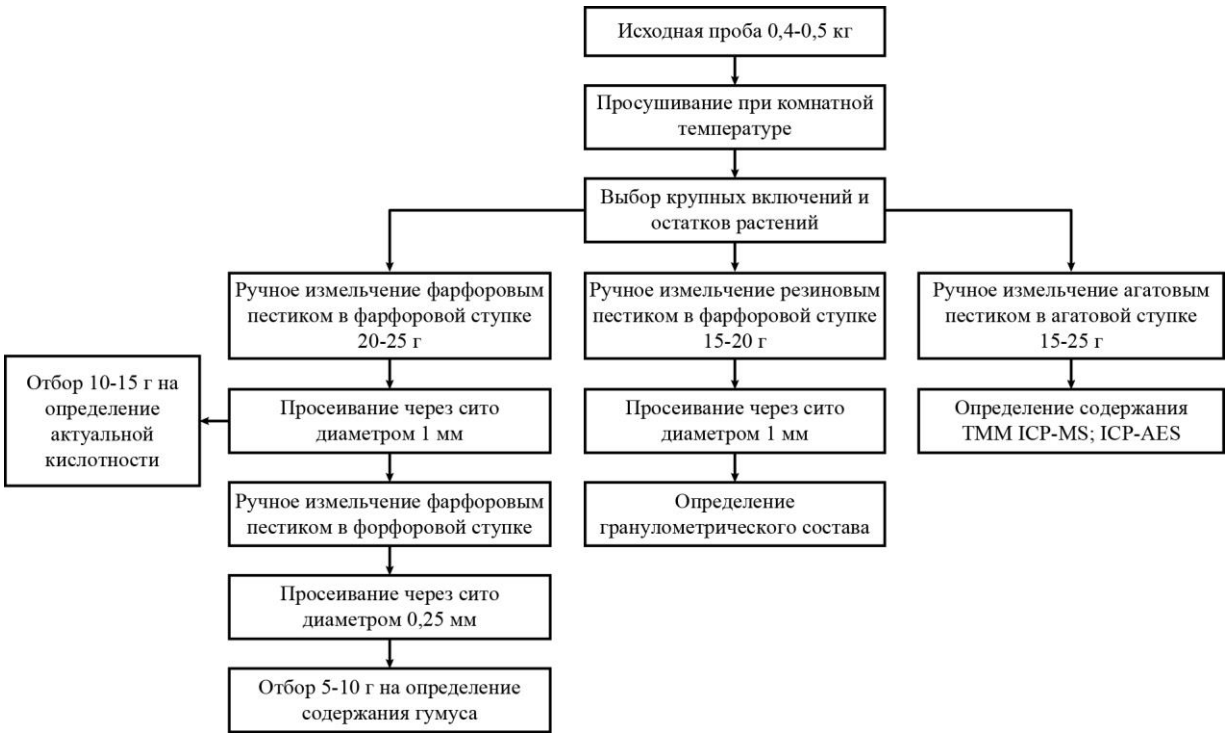


Рис. 14. Схема пробоподготовки почвенных образцов

Пластинки листьев березы плосколистной и гибридного тополя с помощью ножниц отделялись от черешков и, в отличие от хвои лиственницы сибирской, промывались под проточной водой, а затем споласкивались дистиллятом для удаления элементов, осаждающихся на поверхности листа и не участвующих в метаболизме растений (Кошелева, Макарова, Новикова,

2005; Терехина, 2010; Tomasevic и др., 2011). Образцы ассимилирующих и многолетних органов древесной растительности высушивались в течение 6-8 часов при температуре 70-80˚С.

Химико-аналитические работы. В Эколого-геохимическом научно-образовательном центре Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (ЭГЦ МГУ) проводилось исследование основных физико-химических свойств почв (табл. 1): актуальной кислотности (*pH*) потенциометрическим методом в водной суспензии (pH метр pH340i/set); содержания органического углерода ($C_{орг}$) методом И.В. Тюрина с титриметрическим окончанием; гранулометрического состава методом лазерной дифракции (гранулометр «Analysette 22. Laser klasse 1» фирмы «Fritsch»). В образцах хвои и коры лиственницы сибирской Закаменска проведено определение зольности методом, применяемым для торфяных и оторфованных горизонтов почв (ГОСТ 27784-88, 1989) (аналитик Е.В. Терская).

Таблица 1. Перечень химико-аналитических работ

Компонент	Горнопромышленный центр *	Параметр	Метод**	Лаборатория
Почвы	Закаменск ($n_п$ = 129; $n_к$ = 106)	*pH* $C_{орг.}$ Гранулометрический состав	1 2 3	ЭГЦ МГУ
		Валовое содержание ТММ Содержание оксидов Fe, Al, Mn	4 5	ВИМС
	Эрдэнэт ($n_п$=226; $n_к$=57)	*pH* $C_{орг.}$ Гранулометрический состав	1 2 3	ЭГЦ МГУ
		Валовое содержание ТММ Содержание оксидов Fe, Al, Mn	4 5	ВИМС
Листья и кора березы	Закаменск ($n_б$ = 32; $n_л$ = 21)	Содержание ТММ	4	ВИМС
Листья и кора лиственницы		Содержание ТММ	4	
		Зольность	6	ЭГЦ МГУ
Листья древесных растений	Эрдэнэт ($n_т$ = 29; $n_л$ = 20)	Содержание ТММ	4	ВИМС

Примечание. * $n_п$ – количество образцов из поверхностного слоя, $n_к$ – количество образцов из генетических горизонтов; n_i – количество проб древесной растительности: *б* – березы, *л* – лиственницы, *т* – тополя. ** Методы: 1 – потенциометрический; 2 – титриметрический; 3 – лазерной дифракции; 4 – ICP-AES; 5 – ICP-MS; 6 – согласно (ГОСТ 27784-88, 1989).

Валовое содержание 54 ТММ в пробах почв и сухого растительного материала анализировалось масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами с индуктивно-связанной плазмой во ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского на приборах Elan-6100 и Optima-4300 («Perkin Elmer», США). Погрешность определений соответствует нормам погрешности (ОСТ 41-08-212-04, 2005) при определении химического состава по III категории точности (табл. 2). Для подробного анализа выбрано 16 приоритетных загрязнителей с атомной массой

больше 50 атомных единиц, типичных для W-Mo и Cu-Mo месторождений (Сает и др., 1990), обладающих высокой токсичностью для живых организмов в относительно низких концентрациях и способных к биоаккумуляции. Они относятся 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.

Таблица 2. Методы определения и пределы обнаружения (ПО) ТММ

Параметр	Элемент							
	Zn	As	Pb	Cd	Cr	Co	Ni	Cu
Метод	1, 2	2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2	1, 2
ПО, мг/кг	0,5	0,1	0,1	0,009	0,9	0,02	0,08	0,2
Параметр	Элемент							
	Mo	Sb	V	Sr	Ba	W	Sn	Bi
Метод	2	2	1	1, 2	1, 2	2	2	2
ПО, мг/кг	0,02	0,005	0,2	0,03	0,4	0,02	0,03	0,002

Примечение. Методы определения: 1 – ICP-AES; 2 – ICP-MS

2.3. Обработка данных

Статистическая обработка данных проводилась в программных пакетах Statistica 8 и MS-Excel. Вычислялись выборочные средние (m), ошибки средних, средние квадратичные отклонения (σ), коэффициенты вариации ($C_v = \sigma/m \cdot 100\ \%$), максимальные ($max$) и минимальные ($min$) значения, коэффициенты корреляции (r) и другие статистические показатели.

Оценка регионального фона проводилась путем сравнения содержания ТММ в фоновых пробах C_b почв и древесной растительности с эталонными глобальными значениями. При анализе катен полученные значения C_b группировались в зависимости от рода элементарного ландшафта и рассчитывались кларки концентрации $KK = C_b / C_C$ и рассеяния $KP = C_C / C_b$, где C_C – кларк литосферы. В качестве эталонов сравнения использовались оценки различных авторов, рекомендованные в работе Н.С. Касимова и Д.В. Власова (2015). Так, для Co, Cu, V, Bi приняты кларки (Hu, Gao, 2008); для Zn, As, Pb, Cr, Ni, Sb, Sr, W – (Григорьев, 2009); Cd, Mo, Ba – (Rudnick, Gao, 2003); Sn – (Wedepohl, 1995).

Полученные значения для ТММ в фоновых пробах поверхностных горизонтов группировались в зависимости от почвообразующей породы и сравнивались со средними мировыми значениями в почвах C_g (Kabata-Pendias, 2011) путем расчета глобальных коэффициентов концентрации и рассеяния $EF_g = C_b / C_g$, $DF_g = C_g / C_b$. Сравнение со среднемировыми значениями в почвах (Kabata-Pendias, 2011), а не кларками литосферы обусловлено тем, что в поверхностных горизонтах велика роль почвенного органического вещества. Аналогично проводилась оценка фоновых проб древесных растений. В качестве эталонов обычно используют кларки химических элементов, рассчитанные А.П. Виноградовым (1935), Д.П. Малюгой (1963), H. Bowen (1966) и В.В. Добровольским (1983; 2003). В настоящей работе в качестве глобальных эталонов

использовались значения ТММ в ежегодном приросте растений суши (Добровольский, 2003) как наиболее обоснованные. При их расчете использована обширная база аналитических данных и высокочувствительные химико-аналитические методы и приборы.

На основе осредненных значений *КК*, *КР*, EF_g и DF_g построены спектры, характеризующие геохимические особенности фоновых почв, развитых в разных элементарных ландшафтах и на разных почвообразующих породах, а также биогеохимические особенности органов древесных растений.

Геохимическая трансформация почв в катенах оценивалась в зависимости от их геохимической позиции, а поверхностных горизонтов – с учетом литолого-геохимической неоднородности территории. Локальные коэффициенты концентрации $EF_l = C_u / C_b$ и рассеяния $DF_l = C_b / C_u$ элементов (C_u – концентрация элемента в техногенно-измененных образцах) рассчитывались относительно фоновых, относящихся к тому же элементарному ландшафту и той же почвообразующей породе, соответственно. Аналогично анализировалась трансформация микроэлементного состава растений в горнопромышленных центрах.

Локальный коэффициент концентрации аналогичен коэффициенту концентрации K_c, предложенному в работах Саета с соавт. (1990). Исследование горнопромышленных центров Закаменска и Эрдэнэта потребовало провести разделение показателей в зависимости от эталонного значения: EF_g рассчитывался относительно среднемирового содержания в ненарушенных почвах или ежегодном приросте растений суши; EF_l – локальных фоновых содержаний ТММ в почвах или древесных растениях для исследуемой территории.

Геохимические спектры почвенных профилей горнопромышленных центров строились по родам элементарных ландшафтов, а для поверхностных горизонтов и древесной растительности – по отдельным функциональным зонам, отличающимся как уровнями содержания, так и набором приоритетных элементов-загрязнителей. Последний представлен в виде формулы, в которой элементы расположены в порядке убывания коэффициента концентрации EF_l или рассеяния DF_l, а его значения указаны в верхнем или нижнем индексе, соответственно.

Парагенетические ассоциации ТММ в фоновых и городских почвах выявлялись по геохимическим спектрам и дендрограммам, построенным с помощью кластерного анализа (алгоритм Complete Linkage) в программном пакете Statistica 10. Метод кластерного анализа позволяет сгруппировать рассматриваемые элементы в кластеры разного порядка при постепенном снижении порогового значения коэффициента корреляции (r) между валовым содержанием пар элементов (Самонова, Кошелева, Касимов, 1998).

Диагностика латеральных и радиальных геохимических барьеров, а также основных количественных и качественных ландшафтно-геохимические факторов, контролирующих распределение ТММ в почвах, выявлены методом регрессионных деревьев в пакете S-Plus (MathSoft,

2004). Он позволяет прогнозировать уровни содержания металла и его вариабельность при различных сочетаниях факторов, а также оценить значимость последних (Касимов и др., 2011).

Контрастность распределения ТММ в катене характеризовалась коэффициентом латеральной дифференциации *L*, равным отношению содержания поллютанта в рассматриваемом ландшафте к его концентрации в автономном. Он рассчитывался в двух вариантах: по средневзвешенным концентрациям в профиле (L_1) и по содержанию в верхнем гумусовом горизонте (L_2). 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) внеаккумулятивный – при отсутствии выраженных зон аккумуляции в пределах катены; 2) верхне- 3) срединно- и 4) нижне-аккумулятивный типы – при локализации зон аккумуляции в автономных, трансэлювиальных или трансаккумулятивных и супераквальных ландшафтах соответственно.

Контрастность распределения ТММ в почвенном профиле оценивалась с помощью коэффициента радиальной дифференциации *R*, равного отношению концентрации поллютанта в почвенном горизонте к его содержанию в почвообразующей породе. При отсутствии данных о количестве ТММ в горизонте С (он нередко представлен кристаллическими породами) расчет коэффициента был невозможным, и для оценки внутрипрофильного распределения использовали методику Водяницкого (1991), которая обеспечивает сравнение распределения почвенных показателей в разрезах с различными глубиной и интервалами отбора проб. В ней радиальное распределение характеризуется соотношением концентраций элементов в верхней (органогенной) и нижней (минеральной) частях почвенного профиля, отражаемом показателем аккумулятивности *S*. Он позволяет статистически единообразно обработать всю имеющуюся информацию и обеспечить сопоставимость результатов для разных элементов и типов почв. Градации *S* приведены в таблице 3. Расчет этого показателя позволяет определить преобладающий для каждого элемента и каждого типа почвы вид радиального распределения.

Таблица 3. Диапазоны показателя аккумулятивности *S* и соответствующие им градации радиального распределения (Водяницкий, 1991)

Значения *S*	Типы радиального распределения
0,0-0,34	Сильноэлювиальный
0,34-0,49	Слабоэлювиальный
0,5	Равномерное
0,51-0,66	Слабоаккумулятивное
0,66-1,0	Сильноаккмулятивное

Характеристика полиэлементного загрязнения поверхностных почв характеризовалось двумя показателями, так как горнопромышленные центры приурочены к природным металлогеническим аномалиям с повышенными концентрациями рудных и сопутствующих элементов.

Степень геохимической трансформации почвенного покрова под воздействием техногенных источников определялась на основе суммарного показателя загрязнения $Z_c = \sum EF_l - (n - 1)$, где n – число элементов с $EF_l > 1$. Экологическая опасность высокого содержания в почвах ТММ оценивалась с помощью интегрального показателя, учитывающего их токсичность: $ИПЗ = \sum(p \cdot C_u / C_g) - (n - 1)$, где n – число элементов с $C_u > C_g$, p – коэффициент токсичности (для элементов I класса опасности p = 1,5, для II – 1,0, для III – 0,5) (Большаков и др., 1999). В качестве эталона в этом случае брались средние мировые значения в почвах, а не региональный фон со значительно более высокими концентрациями ТММ, нередко превышающими санитарно-гигиенические нормативы. Градации Z_c и *ИПЗ* приведены в таблице 4.

Таблица 4. Уровни загрязнения почв ТММ и соответствующие им градации экологической опасности (Касимов и др., 2012а; Сает и др., 1990)

Значения Z_c и *ИПЗ*	Уровень загрязнения	Степень экологической опасности
< 16	Низкий	Неопасная
16–32	Средний	Умеренно-опасная
32–64	Высокий	Опасная
64–128	Очень высокий	Очень опасная
> 128	Максимальный	Чрезвычайно опасная

Эколого-геохимическая оценка состояния поверхностных слоев почв горнопромышленных центров основана на показателях, разработанных для сопряженных эколого-геохимических и санитарно-гигиенических исследований окружающей среды городов:

- международные санитарно-гигиенические стандарты, принятые в Нидерландах (СП 11-102-97, 1997) для Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd и Pb в почвах с двумя уровнями – допустимым и требующим вмешательства. Если концентрация элемента ниже первого, то почвы относятся к чистым; если превышает его, то это опасно загрязненные почвы;
- региональные нормативы: предельно и ориентировочно допустимые концентрации (ПДК/ОДК) РФ (ГН 2.1.7.2041-06, 2006; ГН 2.1.7.2042-06, 2006) и Монголии (Хөрсний Чанар..., 2008);
- коэффициент кратности превышения ПДК/ОДК отдельных элементов $К_о = C_u / ПДК$.

Интенсивность биопоглощения характеризуется отношением количества элемента в золе растений l_x к его количеству в почве C_s ($КБН_1$) или горной породе C ($КБН_2$) (Уфимцева, Терехина, 2005). Этот коэффициент биологического накопления аналогичен коэффициенту биологического поглощения (Полынов, 1956), однако в качестве названия было выбрано именно это, т.к. поглощение является физиологическим процессом, а накопление – результатом как поглощения, так и внутреннего перераспределения химических элементов. Для количественного выражения способности растений к увеличению концентрации элементов определялся дополнительный показатель – коэффициент биогеохимической активности (*БХА*), который позво-

ляет судить об общей способности растения к увеличению концентрации микроэлементов (**МЭ**) при корневом поглощении (Будкина, 2011; Копылова, 2002). Он рассчитывается отдельно для катионогенных $K_{БХА}$ и анионогенных $A_{БХА}$ элементов и равен отношению суммы $КБН_1$ катионогенных и анионогенных элементов к числу n соответствующих суммированных элементов (Айвазян, Касимов, 1979).

Изменения в микроэлементном составе растительности при техногенном воздействии характеризует комплексный показатель – коэффициент биогеохимической трансформации:

$$Z_v = \sum_{i=1}^{n_1} EF_l + \sum_{i=1}^{n_2} DF_l - (n_1 + n_2 - 1)$$

где EF_l и DF_l – локальные коэффициенты концентрации и рассеяния соответственно, n_1, n_2 – количество МЭ с EF_l >1 и DF_l >1 (Касимов и др., 2012а). Коэффициент Z_v отражает нарушение нормальных соотношений МЭ в органах растений, характерных для их фило- и онтогенетической специализации. Он является количественным выражением дисбаланса химических элементов в растениях, возникающего в результате антропогенной нагрузки. Коэффициент Z_v имеет пять градаций: минимальную (10-20), среднюю (20-30), высокую (30-40), очень высокую (40-60), чрезвычайно высокую (60-80 и более).

Экологическое состояние растений диагностировалось по величине отношений Fe/Mn, Pb/Mn и Zn/Cu. Первое является одним из наиболее информативных показателей фотосинтеза, второе характеризует соотношение техногенного и биофильного элементов, третье – степень пропорциональности в обеспечении этими биометаллами процессов ферментосинтеза (Елпатьевский, Аржанова, 1990; Новикова, 2005; Новикова, Кошелева, 2007; Kosheleva и др., 2016).

Онтогенетическая специалиазция, показывающая изменение в накоплении МЭ разными морфологическими органами растений, обусловленное их физиологическими функциями, типом анатомической ткани, разной степенью выраженности физиологических барьеров поглощения, определялись с помощью предложенного Д.А. Сабининым (1955) и упоминающийся в ряде работ (Авессаломова, 2007; Фортескью, 1985; Brooks, 1973) – акропетального коэффициента *Ак*, названного А.Л. Ковалевским (1969) – отношением содержания в органах растений *ОСОР*. Он равен отношению содержания элементов в различных органах растений: $Ак = C_O/C_{T.O.}$, где C_O – концентрация изучаемого МЭ в исследуемом органе, а $C_{T.O.}$ – в эталонном (коре). Если максимальная концентрация МЭ наблюдается в листьях или побегах, то такое распределение называется базипетальным, если накопление происходит в стеблях, корнях или старых частях растений – акропетальным (Сабинин, 1971).

2.4. Визуализация данных

Функциональное зонирование горнопромышленных центров проводилось автором на основе предоставленных администрацией Закаменска и Эрдэнэта планов городов, космических снимков высокого разрешения, полученных через систему Геопортала МГУ имени М.В. Ломоносова, и полевых данных. Выделено пять функциональных зон (рис. 12, 13): две селитебных – с многоэтажной и одноэтажной (дачной в Закаменске и юрточной в Эрдэнэте) застройкой; промышленная; транспортная; пастбищ (Эрдэнэт) или природно-рекреационная (Закаменск). В состав промышленной входят: участки разработок, промплощадки ГОКов, хвостохранилища, отвалы вскрышных пород, ТЭЦ, военные базы и другие предприятия. Природно-рекреационная зона и пастбищ имеет наибольшую площадь и представлена в Закаменске лиственично-березовыми лесами на склонах долины рр. Модонкуль, Барун-Нарын, Зун-Нарын, а в Эрдэнэте участками луговой растительности между промышленной и селитебной зонами. К фоновым территориям отнесены вершины и пологие склоны холмов в долинах рр. Модонкуль, Барун-Нарын, Зун-Нарын, Эрдэнэтий-Гол, Зуна-Гол.

Картографирование почвенно- и биогеохимических данных выполнено методом локальной интерполяции, или кригинга, в пакетах MapInfo 11.5 и Surfer 11. Основой геохимических карт послужили планы городов и геологические карты: для Закаменска – лист М-48-51-Г, 1997 (Зиновьева и др., 2011); для Эрдэнэта – (Watanabe, Stein, 2000) и материалы, предоставленные С.П. Гавриловой с корректировкой автора. Для предотвращения завышенной оценки загрязнения территории при интерполяции данных не использовались точки с экстремально высокими концентрациями ТММ, превышающими средний уровень в почвах горнопромышленных центров на величину трех и более среднеквадратичных отклонений (Большаков и др., 1999).

Построение карты родов элементарных геохимических ландшафтов. Основной единицей при ландшафтно-геохимических исследованиях катен является элементарный ландшафт, который согласно определению Б.Б. Полынова (1956) в своем типичном проявлении должен представлять один определенный тип рельефа, сложенный одной породой или наносом и покрытый в каждый момент своего существования определенным растительным сообществом. Все эти условия определяют возможность формирования миграционных потоков химических веществ, их направление (радиальное или латеральное), интенсивность и соотношение процессов выноса, аккумуляции и транзита.

В классификации элементарных ландшафтов (Перельман, Касимов, 1999) различают 8 таксономических уровней: ряды, выделяемые по виду миграции (абиогенные, биогенные, техногенные); группы, типы, отделы и семейства – по соотношению важнейших параметров биологического круговорота веществ; классы – по особенностям водной миграции в гумусово-аккумулятивном горизонте почв; роды – по особенностям миграции, определяемым рельефом;

виды – по особенностям горных пород. Построение карты родов элементарных ландшафтов основывается на информации о рельефе изучаемой территории, которая при использовании современных ГИС-программ представляется в виде цифровой модели местности (**ЦММ**).

Карта родов элементарных геохимических ландшафтов для Закаменска и Эрдэнэта создавалась на основе ЦММ, полученной с помощью научного оборудования американского космического шаттла «Индевер», с пространственным разрешением 3 угловые секунды (приблизительно 90 м) и разрешением по высоте 1 м (раданрная съемка Shuttle radar topographic mission). Ее использование является оправданным при выбранном уровне генерализации – масштабе карт 1:50 000 – 100 000, доступности данных и глобальном покрытии. При этом крупные техногенные элементы местности (хвостохранилища, карьеры), которые искажают естественный рельеф территории, заранее покрывались маской.

Производные слои данных о рельефе территории. Элементарный род ландшафта, согласно (Касимов и др., 2012b), определяется четырьмя основными параметрами: крутизной склона, характером кривизны его поверхности и близостью к пойменным ландшафтам и водоразделам. Для их определения была составлена вспомогательная карта гипсометрии территории. Ее основой является растровый слой данных, получаемый путем пересчета значений ЦММ согласно равноинтервальной классификации перепада высот по шкале с шагом 50 м. Для более наглядной передачи пластики рельефа классифицированный по высотам растр ЦММ был дополнен слоями светотеневой отмывки и горизонталей, построенными в ГИС. Результирующая гипсометрическая карта хорошо передает формы рельефа и служит основой для составления других карт.

Ключевое значение в эколого-геохимических исследованиях имеет слой крутизны склонов, где каждая ячейка содержит информацию об угле наклона в градусах или уклона в процентах. Крутизна склонов определяет интенсивность миграции и возможность аккумуляции вещества. Градации углов наклона для склонов различной крутизны предложены в работе (Богданова, Гаврилова, Герасимова, 2012).

Важную информацию о формах рельефа несет слой кривизны вертикальной поверхности. Для каждой ячейки ЦММ на основе анализа соседства был рассчитан показатель вогнутости или выпуклости, вычисляемый по алгоритмам ArcGIS согласно методике (Moore, Grayson, Ladson, 1991; Zevenbergen, Thorne, 1987). Его значения обычно колеблются от -1 (самые вогнутые) до 1 (самые выпуклые), при этом значение 0 соответствует ровным участкам. Вогнутые и выпуклые поверхности наряду с крутизной склонов определяют движение и накопление вещества в ландшафтах. Например, для вогнутых нижних частей склонов характерна аккумуляция поллютантов, для выпуклых поверхностей с большими уклонами характерен их вынос.

Наряду со склонами при картографировании родов элементарных ландшафтов выделяют

водораздельные пространства и сопряженные с ними депрессии. С этой целью на исследуемой территории устанавливают линии водоразделов и зоны подтопления, соответствующие поймам водотоков. Линии водоразделов были найдены с помощью базовых функций анализа растров в ArcGIS и конвертированы в векторный линейный слой. Наиболее сложно было создать слой периодически затопляемых пойм рек, где обычно накапливаются химические вещества. Для этого предлагается использовать алгоритм ArcGIS SMJ Flood Modelling, с помощью которого на основе сведений о среднем многолетнем уровне воды в реках был получен векторный полигон зоны подтопления, которая состоит из участков, высотные отметки которых не превышают урез реки более чем на 2 м.

Граничные значения крутизны склонов комбинировались с классификацией кривизны поверхности и информацией о взаимном расположении ячеек полученных слоев относительно линии водораздела и поймы. Технически эта задача была решена с помощью стандартного калькулятора растров ГИС и инструментов выявления соседства для каждого пиксела. В результате обработки были получены критерии выделения родов элементарных ландшафтов (табл. 5).

Встречаемость различных родов элементарных ландшафтов на территории Закаменска и Эрдэнэта неоднинакова (рис. 15). В первом преобладают трансэлювиальные ландшафты с умеренным ($ТЭ_3$) и активным ($ТЭ_4$) выносом в подчиненные позиции, а во втором, т.к. рельеф представлен полого-холмистой равниной, – трансэлювиальные ландшафтсы со слабым ($ТЭ_1$) и умеренным ($ТЭ_2$) выносом.

Границы районов исследования. Работы проводились в пределах двух горнопромышленных центров, в состав которых входят: шахтно-карьерно-отвальные участки, хвостохранилища, промплощадки ГОКов, зоны влияния предприятий и территории прилегающих городов. Границы районов исследования были определены с учетом орографии, а опробование почв проводилось по основным элементарным ландшафтам.

В Закаменске в нижнем и среднем течении р. Модонкуль естественными границами являютя водоразделы, а в верховьях, где уровень техногенного воздействия и влияние деятельности ДВМК на почвенный и растительный покров минимальны, граница проведена в 500-700 м южнее границы города. Исследования также включали: долину руч. Инкур, являющейся основной транспортной магистралью от карьера на флотационно-гравитационную обогатительную фабрику комбината и зоной разработки Au-W россыпи; нижнюю и среднюю части долины рр. Барун-Нарын и Зун-Нарын, где располагаются места складирования отходов. Общая площадь работ составляет 45,1 км^2.

В Эрдэнэте, подобно Закаменску, исследования проводились в пределах долины нижнемго и среднего течения реки Эрдэнэтий-Гол и частично в бассейнах основных притоков

рр. Гавелин и Зуна-Гол (рис. 16). Их естественными границами были водоразделы. На юге и юго-востоке границы оконтуривают зону влияния отвалов вскрышных пород в размере 500-900 м. Общая площадь исследования составляет 181 км^2.

Таблица 5. Критерии выделения родов элементарных ландшафтов

Крутизна склона, °	Вертикальная кривизна	Соседство выдела с другими элементарными ландшафтами	Род элементарного ландшафта	Индекс
< 5	-1 ÷ +1	Через выдел проходит граница водораздела	Автономный	А
	-1 ÷ +1	Выдел расположен в пределах зоны подтопления	Супераквальный	СА
	-1	Выдел примыкает к зоне подтопления (СА)	Трансаккумулятивный	ТА
	0	Через выдел не проходит граница водораздела, не находится в пределах (СА) и не примыкает к зоне подтопления	Автономный второго порядка	$А_2$
			Трансаккумулятивно-элювиальный	ТАЭ
	+1	Выдел примыкает к пойме (СА) и трансэлювиальными с умеренным выносом ($ТЭ_2$)	Трансэлювиальный со слабым выносом	$ТЭ_1$
5-10	-1; 0	Выдел примыкает к пойме (СА) и трансэлювиальными со слабым выносом ($ТЭ_1$)	Трансаккумулятивный	ТА
	+1	Выдел примыкает к трансэлювиальным со слабым выносом ($ТЭ_1$) и трансэлювиальным с активным выносом ($ТЭ_3$)	Трансэлювиальный с умеренным выносом	$ТЭ_2$
	-1 ÷ +1	Выдел примыкает к трансэлювиальному со слабым выносом ($ТЭ_1$); не примыкает к зоне подтопления (СА)	Трансэлювиальный с умеренным выносом	
10-20	-1 ÷ +1	Выдел раполагается между трансэлювиальными ландшафтами с умеренным выносом ($ТЭ_2$)	Трансэлювиальный с активным выносом	$ТЭ_3$
> 20		Выдел раполагается между трансэлювиальными ландшафтами с активным выносом ($ТЭ_3$)	Трансэлювиальный с интенсивным выносом	$ТЭ_4$

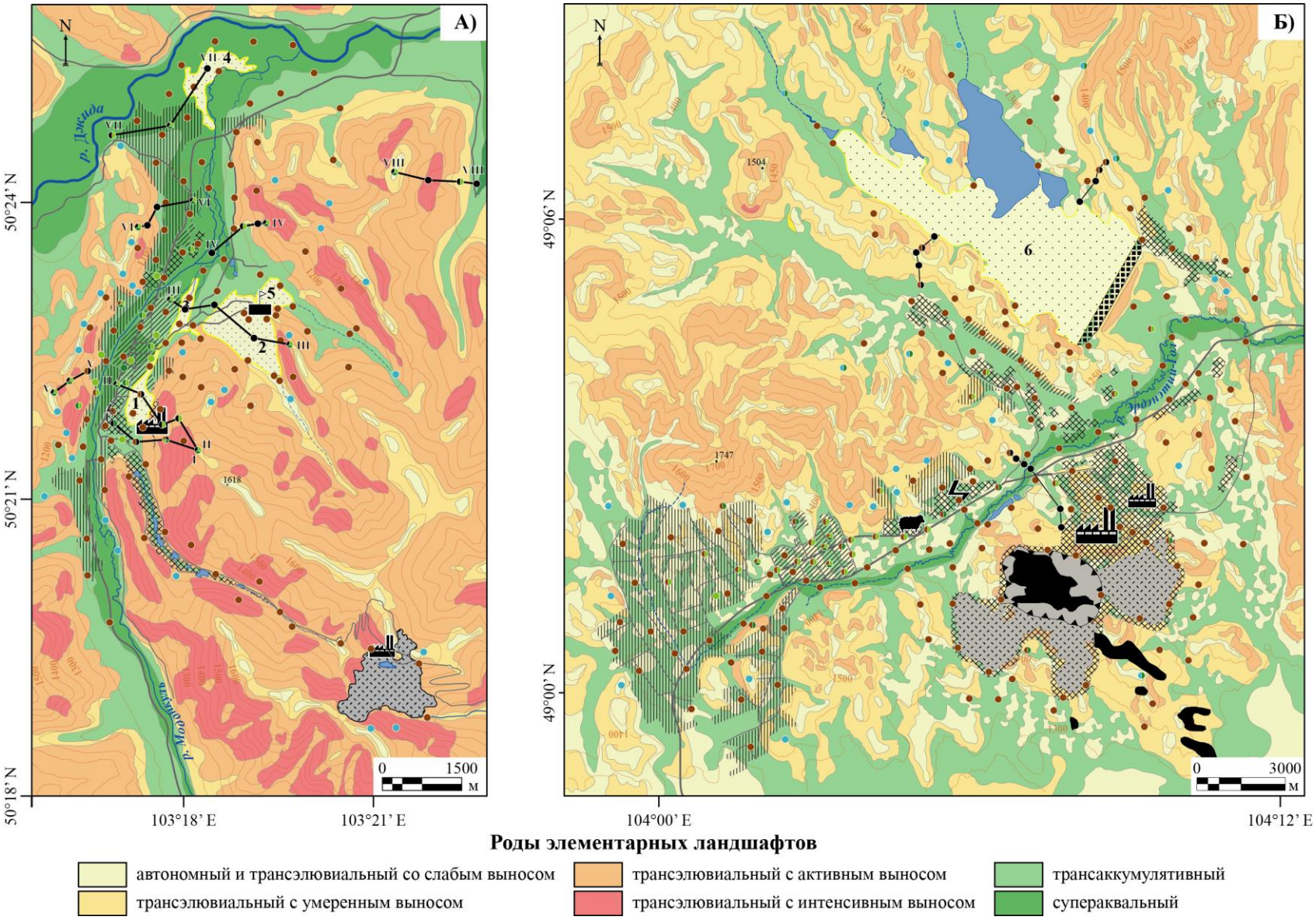


Рис. 15. Карты родов элементарных ландшафтов Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б)

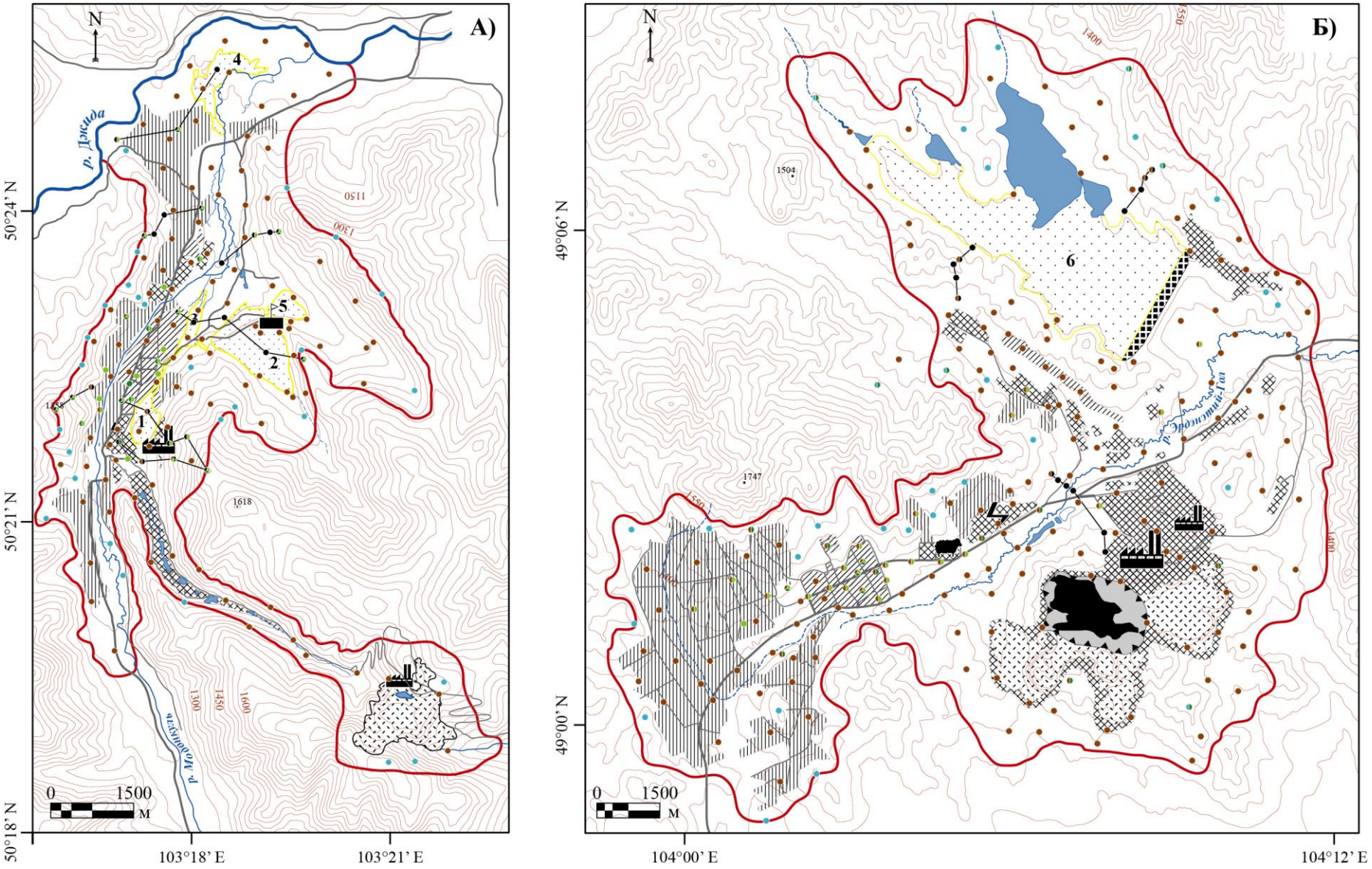


Рис. 16. Границы изучаемых территорий в Закаменске (А) и Эрдэнэте (Б)

ГЛАВА 3. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ

3.1. Геохимическая специализация фоновых почв

Локальный фон выявлен на основе геохимических данных о почвах, сформированных на различных почвообразующих породах – четырех в Закаменске и пяти в Эрдэнэте, каждая из них характеризуется различным содержанием ТММ, которое прослеживается и в поверхностных горизонтах почв. Для каждой пробы рассчитывались глобальные коэффициенты концентрации (EF_g) и рассеяния (DF_g) элементов относительно среднемировых содержаний в почвах (Kabata-Pendias, 2011), затем строились геохимические спектры почв, сформированных на различных почвообразующих породах, в которых элементы ранжированы по убыванию в почвах на джидинском комплексе Закаменска.

Закаменск. Фоновые почвы формируются на 1) аллювиальных песчано-галечниковых и супесчано-суглинистых отложениях; 2) среднепермских-нижнетриасовых ортофирах, кератофирах, туфах, туфолавах чернояровской свиты; 3) кембрийских песчаниках, алевролитах и известняках джидинской и хохюртовской свит; 4) палеозойских плагиогранитах, гранодиоритах и диоритах первой фазы джидинского комплекса. Количество фоновых проб, отобранных в каждом выделе, пропорционально его площади ($S_г$). Так, наиболее типичными для Закаменск являются породы палеозойского Джидинского комплекса ($S_г$ = 40 % от исследуемой), которые представлены 15 почвенными образцами. В них обнаружены наибольшие средние концентрации элементов с установленным классом опасности (табл. 6) I – Zn; II – Co, Cu и Mo; III – Ba и W, а также Bi.

В фоновых почвах на аллювиальных отложениях зафиксированы наибольшие средние значения как опасных элементов – Sr, Ni, Cr, As, так и с неопределенным классом опасности – Sn. Наименьшие средние концентрации практически всех элементов, за исключением Sb и V, выявлены в почвах, развитых на основных и средних эффузивных породах чернояровской свиты.

Содержание рудных элементов и их спутников во всех фоновых пробах, согласно полученным геохимическим спектрам, превышают среднемировые значения (рис. 17 А): W (EF_g = 2,9–20,2), Mo (1,3–7,1), Bi (2,7–3,7), Sb (1,8–4,2). На породах палеозойского джидинского комплекса почвы обогащены W, Mo (EF_g = 7,1-20,2), Bi, Sb, Cu, Co (2-3), Zn, Sr, Ba (1,5-1,9). Обеднены всеми элементами, кроме W, Mo, Sb, Cs, Co, Ba и V, содержание которых близко к эталонным, почвы на чернояровской свите, сложенной эффузивными горными породами.

Природная вариабельность глобальных коэффициентов концентрации укладывается в пределы 1-5 эталонных значений. Выявленные у рудных элементов превышения в 15 и более раз обусловлены приуроченностью W-Mo оруденения к границе двух региональных геологи-

Таблица 6. Статистические показатели для содержания ТММ в поверхностных (0-10 см) горизонтах фоновых почв вблизи Закаменск и Эрдэнэт

	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
Фоновые пробы вблизи Закаменска																
Почвы на палеозойском Джидинском комплексе (*n**=15)	175** 81-300	47,8 37-67	22,8 11-38	34,1 20-67	81 34-200	133 54-200	4,93 3-6,7	274 130-480	7,79 1,4-48	0,37 0,23-0,72	2,64 1,8-3,8	1,6 0,71-3,1	698 380-1200	34,3 3,1-220	31,7 18-100	1,27 0,22-9,8
Почвы на аллювиальных отложениях (*n*=6)	127 89-150	69,3 55-88	14,8 11-18	40,2 30-55	35,5 28-48	98,8 78-120	7,7 4,3-16	290 210-390	3,57 1,9-5,4	0,32 0,28-0,38	2,93 1,9-3,6	2,2 0,66-5,6	507 440-550	7,1 4,5-9,9	22,8 20-29	0,53 0,38-0,66
Почвы на кембрийском комплексе: Хохюртовской и Джидинской свитах (*n*=4)	101 14-170	35,4 8,6-62	13,6 3,3-18	27,8 11-48	39,25 27-67	113 37-200	3,5 1-5,4	205 150-320	5,08 2,1-10	0,47 0,23-0,89	1,73 1,3-2,1	1,2 0,64-2	588 290-1100	31,2 2,1-62	40,5 5,9-90	1,13 0,19-2,9
Почвы на среднепермской-нижнетриасовой Чернояровской свите (*n*=2)	185 –	56,5 –	17,0 –	25,5 –	29,5 –	81,5 –	6,55 –	130 –	1,38 –	0,16 –	2 –	2,8 –	655 –	4,9 –	16,5 –	0,325 –
Фоновые пробы вблизи Эрдэнэта																
Почвы на гранодиоритовой и гранитовой свитах пермского селенгинского комплекса (*n*=13)	172 110-240	56,8 25-95	17,2 9-26	30,3 18-46	42,7 27-61	98,0 73-130	8,28 4,1-17	410 240-640	1,89 1,1-3,1	0,25 0,17-0,34	2,95 1,9-4,6	1,1 0,53-2,1	551 370-880	2,5 1,1-8,2	20,9 16-30	0,253 0,17-0,64
Почвы на четвертичных отложениях (*n*=8)	142 77-170	49,5 23-59	14,8 6-19	25,5 9-32	34,75 29-48	82,3 48-120	8,59 6,5-11	308,75 150-410	2,29 1,4-6,7	0,25 0,18-0,34	2,68 2,1-3,3	1,4 0,7-5,2	575 430-730	2,0 1,5-3,1	22,4 19-33	0,276 0,23-0,42
Почвы на габбро и диоритовой свите пермского селенгинского комплекса (*n*=5)	170 140-210	47,4 28-75	15,0 11-17	27,8 20-37	54,25 36-86	89,6 67-110	9,88 6,1-19	410 340-470	5,56 1,2-17	0,23 0,17-0,26	2,62 2,1-3,3	1,0 0,56-1,9	586 450-720	1,8 1,2-2,7	19,2 15-21	0,228 0,16-0,31
Почвы на триасовой вулканической свите и суб-вулканических интрузивах (*n*=4)	165 110-220	47,0 40-53	16,0 11-26	23,5 19-32	50,75 36-82	80,5 70-99	8,53333 4,8-12	340 280-420	2,93 1,4-4,2	0,24 0,2-0,29	3,05 2,3-4	0,8 0,53-1,2	793 680-920	5,4 1,9-12	23,8 18-29	0,3375 0,18-0,57
Почвы на раннемезозойских порфировых интрузивах (*n*=2)	165 –	54,5 –	16,5 –	26,5 –	50,5 –	95,5 –	13 –	325 –	3,85 –	0,28 –	3,20 –	1,2 –	600 –	3,4 –	25,5 –	0,325 –
Среднемировые значения в почвах (Kabata-Pendias, 2011)																
	129	59,5	11,3	29	38,9	70	6,83	175	1,1	0,41	2,5	0,67	460	1,7	27	0,42

Примечание. * n – количество образцов; ** над чертой указано среднее содержание, под чертой – минимум-максимум.

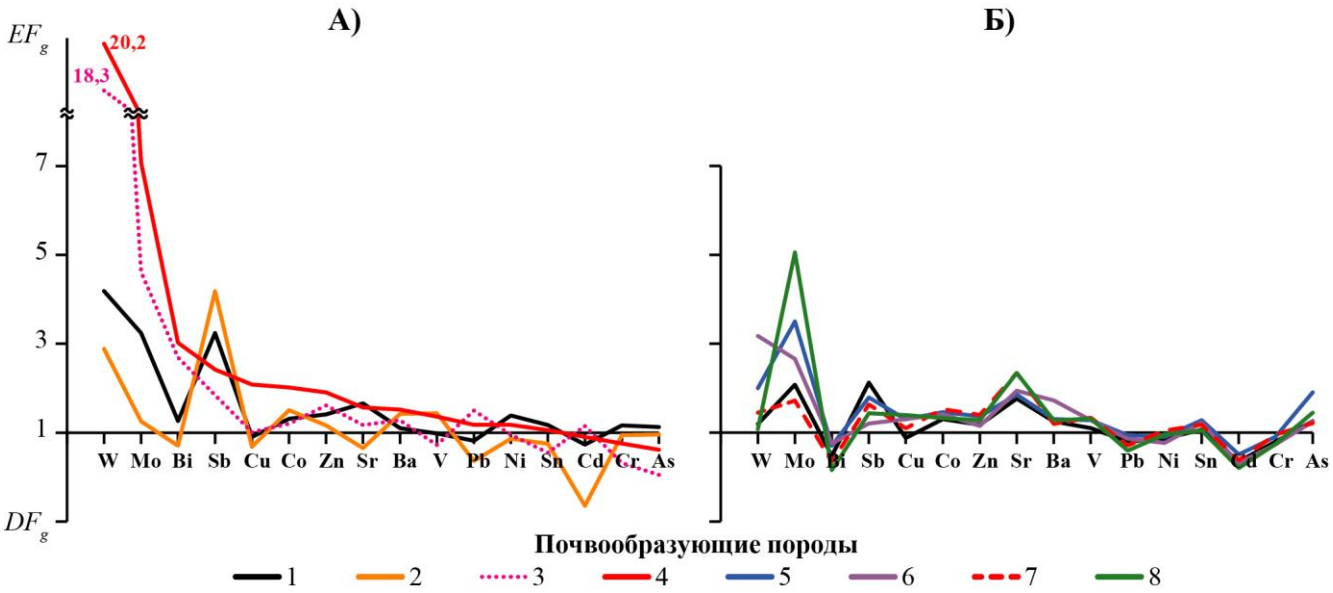


Рис. 17. Геохимические спектры фоновых почв вблизи Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б). Фоновые почвы сформированные на: 1 – четвертичных отложениях. Вблизи Закаменска: 2 – среднепермской-нижнетриасовой черноярovской свите; 3 – кембрийской комплексе (джидинская и хохюртовская свиты); 4 – палеозойский джидинской комплекс (первая фаза). Вблизи Эрдэнэта: 5 – раннемезозойских порфированых интрузивах; 6 – триасовой вулканической свите и суб-вулканических интрузивах; 7 – гранодиоритовой и гранитовой свитах пермского селенгинского комплекса; 8 – габбро и диоритовой свитах пермского селенгинского комплексов.

ческих структур: карбонатно-терригенной толще нижнего палеозоя Джидинского синклинория и интрузивам гранитоидов Модонкульского массива (Папов, 2007). Фоновые почвы со средними значениями этих элементов, близкими к среднемировым концентрациям, распространены за границами рассматриваемых геологических структур и формируются на иных почвообразующих породах, поэтому не могут служить природными геохимическими аналогами для горнопромышленного центра Закаменска.

Эрдэнэт. Почвообразующие породы представлены: 1) четвертичными аллювиальными отложениями; 2) раннемезозойскими порфировыми интрузивами; 3) триасовой вулканической свитой и суб-вулканическими интрузивами; 4) гранодиоритовой и гранитовой свитами пермского селенгинского комплекса; 5) габбро и диоритовыми свитами пермского селенгинского комплекса. Наиболее распространенными для Эрдэнэта являются гранодиоритовая и гранитовая свиты пермского селенгинского комплекса ($S_г$ = 50 % от исследуемой). В почвах, сформированных на этих отложениях, установлены наибольшие средние концентрации V, Cr, Co, Ni, Zn, Sr (табл. 6). В этих же образцах зафиксированы максимальные значения рудных элементов Cu и Mo и их спутников Zn и W. Распределение ТММ обусловлено унаследованностью микроэлементного состава от почвообразующих пород (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Раннемезозойские порфировые интрузивы распространены на ограниченной площади ($S_г$ = 3-4 % от исследуемой), а выборка фоновых проб состоит всего из двух. Для почв, сформированных на этих отложениях, характерны высокие значения для As, Cd, Sn, Pb. Наименьшими

концентрациями рассматриваемых элементов отличаются поверхностные горизонты почв в ареале распространения триасовой вулканической свиты и суб-вулканических интрузивов.

Анализ геохимических спектров (рис. 17 Б) выявил, что к элементам, превышающим средние мировые содержания во всех фоновых почвах, относятся Mo (EF_g = 1,7–5,1), Sb (1,2–2,4) и Sr (1,8–2,3). Почвы на раннемезозойских порфировых интрузивах обогащены также W и As, а на триасовой вулканической свите и суб-вулканических интрузивах – W и Ba. Наибольшее рассеяние во всех пробах выявлено для Bi (DF_g = 1,5-1,8) и Cd (1,6-1,8). В целом же все фоновые пробы характеризуются около эталонными значениями – глобальные коэффициенты концентрации и рассеяния лежат в диапазоне 1,0-1,5.

Таким образом, содержание ТММ в фоновых почвах отражает геохимические особенности почвообразующих пород (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010; Смирнова, Плюснин, 2013). Концентрации изучаемых элементов, за исключением рудных и их спутников вблизи Закаменска и Эрдэнэта, незначительно отличаются от среднемировых значений почв (EF_g = 1,0-3,7; DF_g = 1,0-2,6), что позволяет использовать данные поверхностные пробы в качестве локальных геохимических фонов для выявления приоритетных элементов-загрязнителей на территории горнопромышленных центров. В целом почвы обогащены халькофильными (Greenwood, Earnshaw, 1997) элементами: в Закаменске – W, Mo, Bi, Sb, а в Эрдэнэте – Mo, Sb, Sr.

3.2. Геохимическая специализация почв горнопромышленных центров

Для выявления приоритетных загрязнителей почв для каждой пробы рассчитывались локальные коэффициенты концентрации (EF_l) и рассеяния (DF_l) элементов относительно фоновых почв, развитых на той же почвообразующей породе, затем для каждого горнопромышленного центра строились геохимические спектры почв разных функциональных зон, в которых элементы ранжированы по убыванию в промышленной зоне Закаменска.

Закаменск. Наиболее загрязнены почвы промышленной зоны (рис. 18 А), в которой накапливаются Bi, W, Cd, Be, Pb, Mo, Sb, Cu, Zn, Sn, As (табл. 7), что согласуется с ранее опубликованными данными (Смирнова, Плюснин, 2013). Перечень элементов-приоритетных загрязнителей обусловлен их поступлением из нескольких источников: хвостохранилищ с высоким содержанием этих веществ, унаследованным от исходных руд (Смирнова, Плюснин, 2013), от завода «Литейщик», выбросы которого содержат W, Sb, Mo, Pb, Cu, Cr, As (Сает и др., 1990; Benin и др., 1999; Fernandez-Camacho и др., 2010; Goix и др., 2011; Mico и др., 2006), от ТЭЦ, работающей на мазуте, минеральные компоненты которого включают соединения V, Ni, Cr, Mo, Pb, Cu (Новоселов, 1983; Сает и др., 1990; Pacyna и др., 2007).

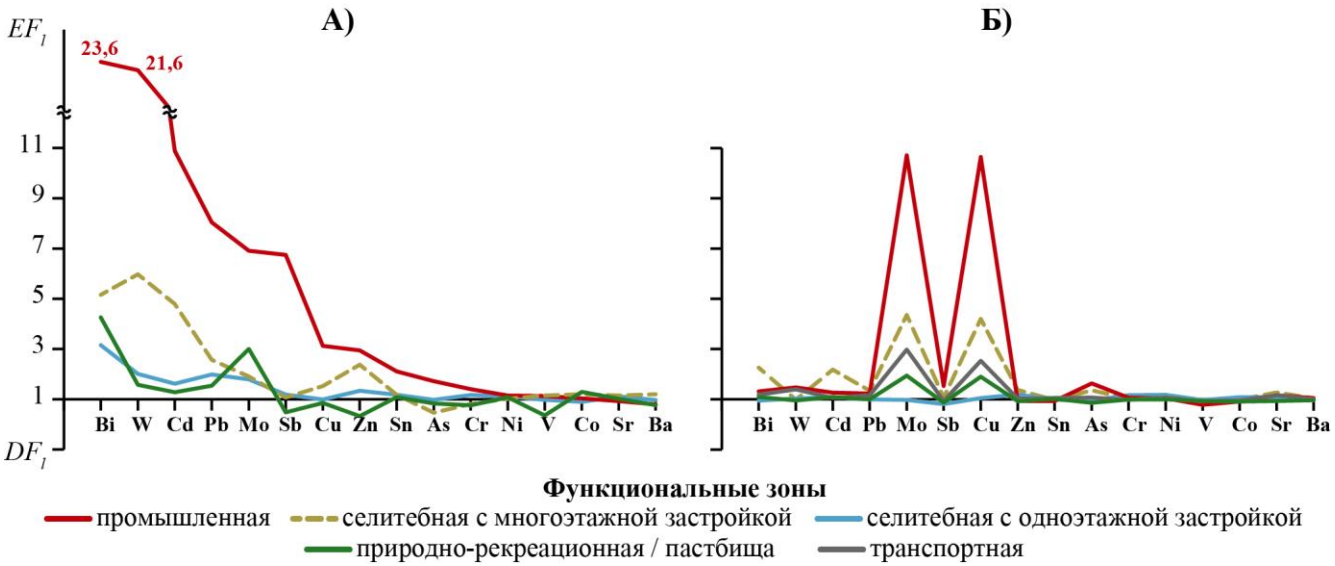


Рис. 18. Геохимические спектры почв разных функциональных зон Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б)

Селитебная зона с многоэтажной застройкой – вторая по уровню загрязнения почв (рис. 18 А), из-за примыкающих к ней техногенных песков Джидинского хвостохранилища с повышенной по сравнению с горными породами аэрируемостью и водопроницаемостью. Поэтому здесь наблюдается его активная дефляция, водная эрозия, плоскостной смыв и химическое сернокислотное выветривание, что приводит к увеличению скорости окисления сульфидов и растворения продуктов выветривания. Их латеральная миграция вызывает обогащение почв близлежащей жилой зоны W, Bi, Cd, Pb, Zn, Mo, Cu (табл. 7).

Таблица 7. Геохимическая специализация почв Закаменска и Эрдэнэта

Функциональная зона	Закаменск	Эрдэнэт
Промышленная (n*= 51 / 51)	$Bi^{23,6}W^{21}Cd^{10,8}Pb^{8}Mo^{6,9}Sb^{6,6}Cu^{3,1}Zn^{2,9}Sn^{2,1}As^{1,7}$**	$Mo^{10,7}Cu^{10,6}As^{1,6}Sb^{1,5}W^{1,5}$
Селитебная с городской застройкой (n= 6 / 19)	$W^{6}Bi^{5,2}Cd^{4,8}Pb^{2,6}Zn^{2,4}Mo^{1,9}Cu^{1,5}$	$Mo^{3,4}Cu^{3,2}Bi^{2,3}Cd^{2,2}Zn^{1,4}$
Селитебная с одноэтажной застройкой (n= 25 / 40)	$Bi^{3,1}W^{2}Pb^{2}Mo^{1,8}Cd^{1,6}Zn^{1,3}$	–
Транспортная (n= – / 16)	–	$Mo^{3}Cu^{2,5}$
Природно-рекреационная / Пастбища (n= 23 / 68)	$Bi^{4,3}Mo^{3}W^{1,6}Pb^{1,5}$	$Mo^{1,9}Cu^{1,9}$
В целом по горнопромышленному центру (n= 105 / 194)	$Bi^{9}W^{7,8}Cd^{4,6}Pb^{3,5}Mo^{3,4}Sb^{2,4}Zn^{1,7}Cu^{1,6}$	$Mo^{4,2}Cu^{4,1}$

Примечание. *n – количество образцов в Закаменске / в Эрдэнэте; ** верхний индекс – значения EF_l

Почвы селитебной зоны с одноэтажной (дачной) застройкой, расположенной в основном на левом берегу р. Модонкуль, и природно-рекреационной зоны не загрязнены (табл. 7) – значения EF_l близки к фоновым, т. е., как правило, не превышают 1,0-1,3. Исключением являются

рудные элементы W, Mo (EF_l=1,6-3) и их спутники Bi, Cd (1,6-4,3). Для селитебной зоны также выявлено слабое накопление Pb и Zn, источниками которых обычно являются продукты автотранспорта (табл. 8).

Таблица 8. Состав выбросов автотранспорта (Власов, 2015; Adachi, Tainosho, 2004; Ajmone-Marsan, Biasioli, 2010; Charlesworth, Miguel De, Ordonez, 2011; Demetriades, Birke, 2015; Gietl и др., 2010; Iijima и др., 2007; Limbeck, Puls, 2010; Quiroz и др., 2013)

Тип выброса	Элементы
Эмиссия выхлопных газов, содержащих в т.ч. присадки к топливу	S, Pb, Cu, Sr, Pd, Pt, Rh
Эмиссия моторного масла, содержащего различные присадки	Fe, Ca, Mg, S, Zn, Pb, Cu, Sb, Mo
Истирание шин	Cd, Fe, Mn, Zn, Ba, Pb, Co, Ni, Cr, Cu, Sb
Износ тормозных колодок и механизмов	Fe, Cu, Zr, Ba, Ca, Sb, Mn, Zn, Ti, Pb
Абразия дорожного покрытия и разметки	Si, Ag, Be, As, Zn, W, Cr, V, Fe, Ti, Co
Выдувание дорожной пыли и почвенных частиц	K, Si, Al, Fe, Ca, Mg, Mn, Ti, Pb, Ce, Cr,Sc, Sr, Th

Эрдэнэт. В зоне влияния ГОК «Эрдэнэт», как и в Закаменске, наиболее загрязнена промышленная зона (рис. 18 Б), где в почвах накапливаются Mo, Cu, As, Sb, W (табл. 7). Основным источником ТММ является аэрогенное поступление при: взрывных работах на карьере; дроблении на промплощадке до частиц размером 0,07 мм и менее (АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001) извлекаемой породы, обогащенной этими элементами (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010); эоловом переносе материала хвостохранилищ. К второстепенным источникам можно отнести выбросы ТЭЦ и пыль от складированного угля из разрезов Баганур и Шарынгол с повышенными относительно глобальных кларков для угля (Юдович, Кетрис, 2006) концентрациями As (EF_g=17,1), Sb (4,2) и других ТММ.

Везде, за исключением юрточной зоны, выявлено высокое содержание рудных элементов Cu и Mo. В селитебной зоне с многоэтажной застройкой почвы обогащены Bi, Cd, Pb, Zn (табл. 7). Первые два металла типичны для отложений пермского периода (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010), наиболее распространенных в пределах этой зоны, а также содержатся в продуктах сжигания угля, источниками двух других являются выбросы автотранспорта (табл. 8).

Минимальные значения локальных коэффициентов концентрации ТММ приурочены к юрточной зоне (рис. 18 Б), из-за ее удаленности от месторождения на 5-7 км и преобладания ветров западного и юго-западного направлений. Геохимические различия между почвами фоновых условий и горнопромышленных центров по всем элементам здесь незначительны (EF_l=1,0-1,2; DF_l=1,0-1,2).

Таким образом, спецификой изучаемых горнопромышленных центров является высокое

содержание в почвах рудных элементов и их спутников, обусловленное техногенным влиянием – изъятием из недр концентрированных скоплений полезных компонентов. Оно проявляется в изменении баланса эрозионно-аккумулятивных процессов, смене направленности и интенсивности процессов рельефообразования, а также вовлечении в миграционные потоки больших количеств поступающих ТММ. В результате верхние горизонты почв рассматриваемых горнопромышленных центров отличаются высокими концентрациями халькофильных элементов: Закаменск – $Bi^{9}W^{7,8}Cd^{4,6}Pb^{3,5}Mo^{3,4}Sb^{2,4}\,Zn^{1,7}Cu^{1,6}$; Эрдэнэт – $Mo^{4,2}Cu^{4,1}$ (верхний индекс – значение EF_l). 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 – рассеивающиеся в ландшафтах отходы ГОКа, рудовмещающие и вмещающие породы месторождения, обогащенные рудными элементами, выбросы ТЭЦ и дефляция складированного угля. В обоих горнопромышленных центрах наиболее техногенно-нарушенными являются поверхностные горизонты почв промышленной зоны, наименьшее воздействие испытывают почвы селитебной зоны с одноэтажной застройкой.

3.3. Парагенетические ассоциации тяжелых металлов и металлоидов в почвах горнопромышленных центров

Кластерный анализ содержания ТММ в поверхностных горизонтах почв позволяет определить парагенетические ассоциации элементов, которые характеризуются общими зонами выноса и аккумуляции.

Закаменск. В поверхностных горизонтах выделены две полиэлементные ассоциации (рис. 19 А): Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn, As–Sb–Pb–Mo; а также три пары элементов V–Co; Sr–Ba; Cr–Ni. Первая ассоциация объединяет главные (Goldschmidt, 1930), т.е. наиболее часто встречающиеся в виде соединений с халькогенами (S, Se и Te), и второстепенные (Greenwood, Earnshaw, 1997), проявляющие подобные свойства в определенной геологической обстановке, халькофильные элементы. Они в почвах Закаменска обладают наиболее высокой корреляционной связью (r=0,57-0,92). Кроме комплексообразователя W, мигрирующего в сильнощелочных содовых водах, и слабоподвижного анионогена Sn, ТММ первой ассоциации представлены катионогенными элементами, слабоподвижными в окислительной и глеевой обстановках (Перельман, Касимов, 1999). Они присутствуют в коренных породах Первомайского штокверка, сульфидно-вольфрамового Инкурского и Холтосонского месторождений, ранее разрабатываемых ДВМК (Зиновьева и др., 2011; Смирнова, Плюснин, 2013).

Образование второй парагенетической ассоциации и трех пар (рис. 19 А) обусловлено петрохимическими особенностями почвообразующих пород и присутствием этих ТММ в поро-

дах W-Mo месторождений (Смирнова, Плюснин, 2013; Смирнова, Ходанович, Яценко, 2006). Полиэлементная ассоциация состоит из главных халькофильных элементов As, Sb, Pb, Mo. Наиболее сильная корреляция обнаружена между Pb и Sb (r=0,85).

V и Co являются антагонистами: литофильный и халькофильный; анионогенный и катионогенный. V подвижен в окислительной обстановке и инертен в восстановительной; Co, наоборот, подвижен в глеевой обстановке и инертен в окислительной и сероводородной. Однако, распределение этой пары элементов (r = 0,52) близко к равномерному (C_v = 30 и 41% соответственно) , а их сонахождение, скорее всего, обусловлено природными факторами – повышенными концентрациями в небольших образованиях габбро, распространенных на всей исследуемой территории, где содержание V достигает 400, а Co – 50 мг/кг.

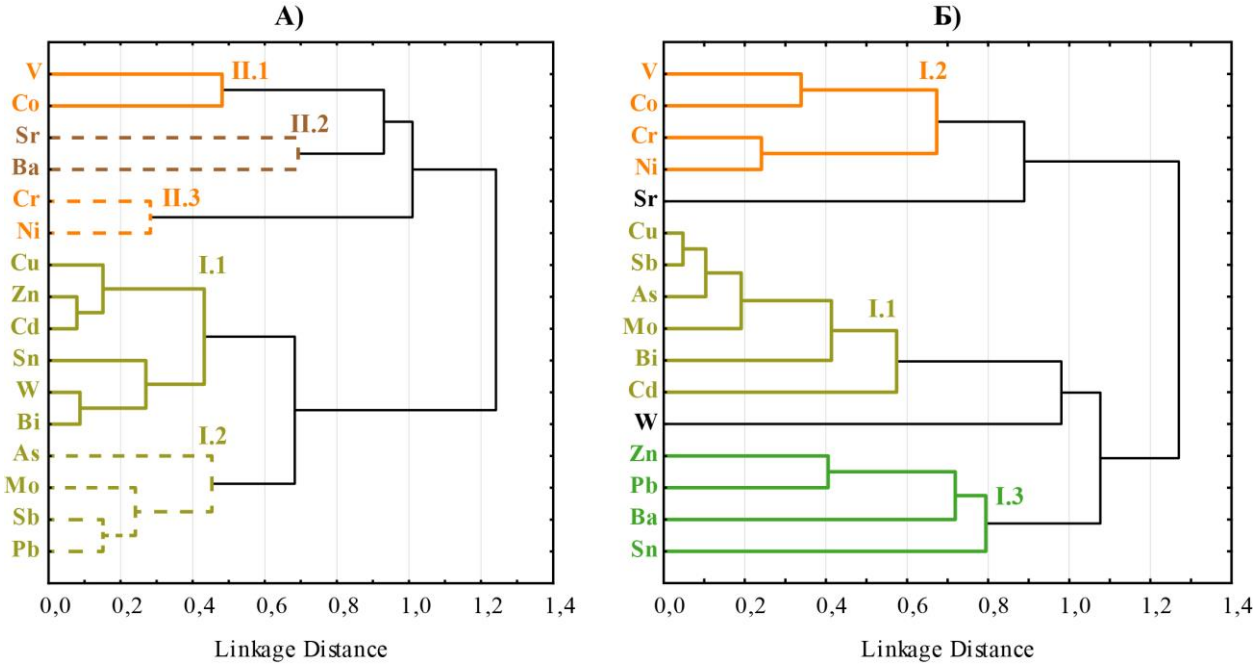


Рис. 19. Группирование ТММ в поверхностных слоях почв Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б) методом кластерного анализа: I.1-I.3 – полиэлементные ассоциации; II.1-II.3 – пары элементов.

Для Sr-Ba и Cr-Ni значения коэффициента корреляции составляют 0,31 и 0,72 соответственно. Первые являются катионогенными (Перельман, Касимов, 1999) и относятся к группе главных элементов горных пород, которые образуют устойчивые ионы с 8-электронной наружной оболочкой. Их вариабельность очень низкая (C_v = 30 и 31% соответственно). Вторые, согласно геохимической классификации А.Н. Заварицкого (Сауков, 1975), основанной на поведении элементов в магматических и гидротермальных процессах, принадлежат к группе железа и по своему поведению в земной коре занимают промежуточное положение между петрогенными и металлогенными элементами.

Эрдэнэт. В поверхностном слое почв в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» выявлены три полиэлементные парагенетические ассоциации, включающие 14 из 16 рассматриваемых элементов (рис. 19 Б): Cu–Sb–As–Mo–Bi–Cd, Cr–Ni–V–Co, Zn–Pb–Ba-Sn. Первая объединяет халько-

фильные катионогенные (Cu, Bi, Cd) и анионогенные (Sb, As, Mo) элементы (Перельман, Касимов, 1999; Greenwood, Earnshaw, 1997), преобладающие в рудных телах и вмещающих породах Эрдэнэтского комплекса (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Во вторую ассоциацию входят четыре элемента (рис. 19 Б), которые относятся к халькофильным (Ni, Co) и литофильным (Cr, V). Последние, по классификации В.М. Гольдшмидта (1930), слагают основную массу минералов земной коры и образуют наиболее устойчивые соединения с кислородом, но также широко распространены и их галогениды, карбонаты, сульфаты и фосфаты. Наиболее сильная корреляционная связь установлена между Cr и Ni (r=0,76). Первый является комплексообразователем, мигрирующим с органическими комплексами, а второй – катионогенным и подвижным/слабоподвижным металлом в окислительной и глеевой обстановках (Перельман, Касимов, 1999). Еще одна пара элементов, входящих в данную ассоциацию, V и Co (r=0,66) являются полными антагонистами: V – подвижный и слабоподвижный в окислительной обстановке и инертен в восстановительной, а Co – подвижный в глеевой и инертен в окислительной (Перельман, Касимов, 1999). Однако рассматриваемые ТММ имеют два общих признака: во-первых, они относятся к элементам группы железа (Сауков, 1975); во-вторых, имеют близкое распределение в горных породах изучаемой территории, поскольку преобладающим на первом этапе формирования Селенгинского комплекса амфиболовым габбро и диоритам свойственно повышенное содержание V–Co–Cr–Ni (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Третья ассоциация (рис. 19 Б) объединяет халькофильные (Zn, Pb, Sn) и сидерофильные (Ba) элементы (Greenwood, Earnshaw, 1997), которые концентрируются преимущественно в гранитах и граносиенитах (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010), широко распространенных на изучаемой территории. Дополнительным источником этих элементов являются продукты эмиссии выхлопных газов и моторного масла, истирания шин, износ тормозных колодок и механизмов, абразия дорожного покрытия и разметки, сжигание угля и бытовых отходов на свалках, особенно Pb и Sn (Bontempi и др., 2010). Но все элементы ассоциации слабоподвижны в окислительной и глеевой обстановках, инертны в восстановительной сероводородной (Перельман, Касимов, 1999).

Оставшиеся элементы W и Sr не ассоциируются с другими ТММ и имеют свойственные только им особенности пространственного распределения.

Таким образом, 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. В зоне влияния ГОК «Эрдэнэт», в отличие от ДВМК, выделена полиэлементная ассоциация смешанных халькофильно-сидерофильных ТММ Zn–Pb–Ba-Sn. Генезис этих групп обусловлен петрохимическими особенностями горных вулка-

нических пород, преобладающих в процессе формирования рудных тел, вмещающих пород и прилегающих геологических структур. Вторичным источником является процесс извлечения полезных компонентов, при котором происходит рассеивание элементов и включение их в миграционных потоки, что приводит к изменению концентраций ТММ в почвах и других компонентах горнопромышленных ландшафтов.

3.4. Пространственная структура загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами почвенного покрова

Дифференциация элементов в почвенном покрове горнопромышленных центров рассмотрена для парагенетических ассоциаций, выделенных с помощью кластерного анализа и охарактеризованных частными суммарными показателями загрязнения $Z_c\,(i)$, где i – номер ассоциации.

Закаменск. Две устойчивые полиэлементные ассоциации Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn и As–Sb–Pb–Mo имеют общую зону аккумуляции в центре, включающую аварийное, Барун-Нарынское, Зун-Нарынское и Джидинское хвостохранилища (рис. 20). На участке аварийного сброса, рекультивированного в 2011 г., обнаружено наибольшее количество элементов с максимальными концентрациями, приуроченными к вышедшему на дневную поверхность погребенному гумусовому горизонту, в который на протяжении более 60 лет деятельности ДВМК происходили вмывание и последующее закрепление металлов на биогеохимическом барьере. Содержание Sb превышает фон в 356 раз; Cd – 70; Mo, Bi, Cu, W – 55-42; Pb, As – 37-34; Zn и Sn – в 12-6 раз.

В Барун-Нарынском хвостохранилище локальные коэффициенты концентрации EF_l для элементов из двух полиэлементных ассоциаций составляют Bi – 69, Sb – 49, W – 35, Pb – 32, Cd – 28, Mo – 11, Sn – 10, Cu – 10, Zn – 10, As – 5, а в Зун-Нарынском 70, 11, 45, 27, 23, 4, 6, 9, 8, 2 соответственно. В Джидинском хвостохранилище лежалых техногенных песков с 1941 по 1958 г. складировали отходы ДВМК, в его юго-восточной части находится спецотвал сульфидного промпродукта (Ходанович, 1999; Ходанович и др., 2002). Средние содержания в этой зоне аккумуляции превышают фоновые для Sb в 48 раз, Cd, Pb, Bi – 38-31, W, Cu – 29-25, Zn, Mo, As, Sn – в 9-4 раза. Их источником, вероятнее всего, являются сульфидно-вольфрамовые Инкурское и Холтосонское рудные и россыпные месторождения, разрабатываемые ранее ДВМК.

Рассматриваемые ассоциации образуют слабоконтрастную аномалию в долине р. Модонкуль, вытянутую с юга на север на 7,5 км и захватывающую восточную часть поймы до ее впадения в р. Джиду. Своим формированием она обязана плоскостному смыву и дальнейшему транспорту речным потоком тонкой фракции Барун-Нарынского и аварийного хвостохранилищ, что подтверждается преобладанием в них крупнозернистой и щебнистой составляющих (Ходанович, Яценко, Смирнова, 2002). Вторая зона аккумуляции – техногенное Мо-

донкульское месторождение, расположенное ниже хвостохранилищ. Оно сложено в основном мелкозернистыми песками, имеет в разрезе тонкую ритмичную, подобную ленточной, слоистость, отражающую периодические крупные разливы р. Модонкуль (Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002). Осаждение ТММ происходит на седиментационном геохимическом барьере, где река резко меняет направление течения с меридионального на субширотное . Поверхностные горизонты почв и техногенных поверхностных образований (**ТПО**) в этой части долины р. Модонкуль характеризуются превышением фоновых значений для Bi, Mo, W 30-62, Sb, Cd, Pb, Sn – 4-17, Zn и Cu – 4 раза.

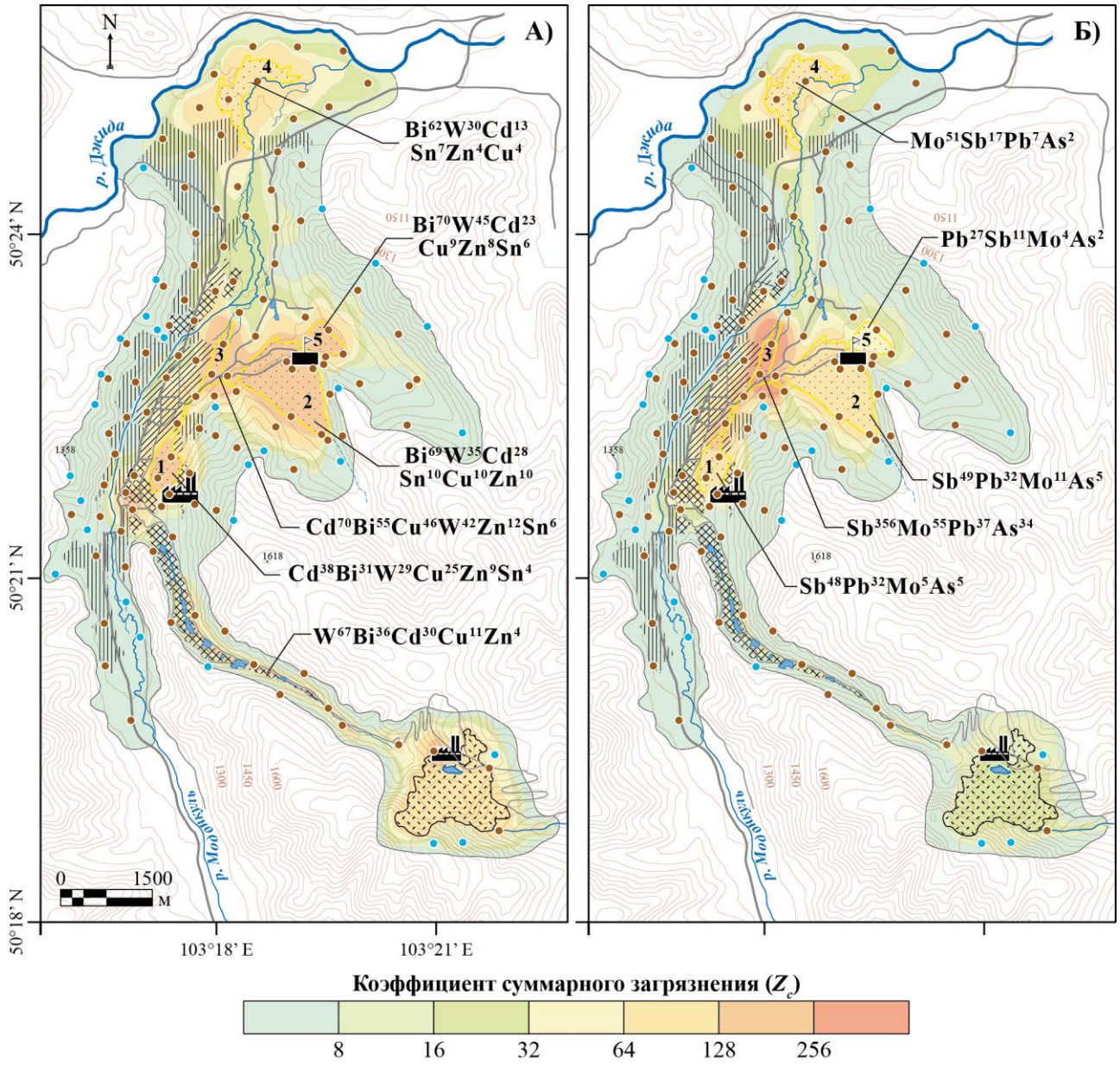


Рис. 20. Распределение суммарного показателя загрязнения (Z_c) I (А) и II (Б) полиэлементных парагенетических ассоциаций в поверхностном слое почв Закаменска. В верхнем индексе элементов указан EF_l . Хвостохранилища: 1 – Джидинское; 2 – Барун-Нарынское; 3 – аварийное; 4 – Модонкульское; 5 – Зун- Нарынское

В запруженной долине р. Инкур выявлена аномалия Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn, где их содер-

жание в 4-67 раза превышают фоновые концентрации (рис. 20 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. с частичным уничтожением почвенного покрова, изменением рельефа местности и загрязнением почв и вод широким спектром ТММ (Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002).

Пространственное распределение трех пар элементов V–Co, Sr–Ba, Cr–Ni характеризуется низкой изменчивостью частного суммарного показателя загрязнения – его коэффициент вариации C_v изменяется в пределах от 25 до 35%, что свидетельствует о достаточно однородном распределении этих элементов, поэтому карты не приводятся. Слабоконтрастные аномалии установлены в местах складирования отходов: в Зун-Нарынском хвостохранилище накапливаются Cr (EF_l=3,9) и Ni (2,5), что обусловлено его повышенной обводненностью и, как следствие, восстановительными условиями, в которых эти элементы обладают низкой подвижностью (Иванов, 1995); в Барун-Нарынском – Cr (6,7), V (3), Co (2,3), что связано, как отмечалось ранее, с наличием частичек габбро, обогащенных этими элементами. Наименьшие содержания Sr и Ba обнаружены на участке аварийного складирования отходов, в Барун-Нарынском и Зун-Нарынском хвостохранилищах. Рассеяние этих элементов объясняется отсутствием почвенно-растительного покрова, как биогеохимического барьера для элементов, и низким содержанием глинистых минералов, способных фиксировать ТММ (Иванов, 1995). Высыхание хвостохранилищ при закрытии ДВМК привело к смене восстановительной обстановки на окислительную, что в сочетании с кислой реакцией среды способствует мобилизации и выносу Sr и Ba за его пределы. На всей остальной территории Закаменска содержания V, Co, Sr, Ba, Cr, Ni в поверхностном слое почв превышают фоновые концентрации менее чем в 2,5 раза.

Эрдэнэт. Выделенные парагенетические ассоциации ТММ (рис. 19 Б) имеют близкое пространственное распределение в почвенном покрове горнопромышленного центра. Первая (Cu–Sb–As–Mo–Bi–Cd) характеризуется двумя контрастными зонами аккумуляции (рис. 21): северной и восточной. Северная с локальными коэффициентами накопления EF_l от 1,7 (Bi) до 56,8 (Mo) приурочена к хвостохранилищу. Она возникла и постепенно расширяется в результате складирования отходов ГОК «Эрдэнэт», состоящих из отработанной горной породы штокверкового Эрдэнэтского месторождения, которые обогащены этими элементами (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Восточная, наиболее контрастная аномалия расположена на территории ГОКа, где содержание Cu превышает фоновый уровень в 213 раза, Mo – 95, As – 14, Sb – 10, Bi – 5,1, Cd – 3,4. Формирование этой аккумуляции связано с осаждением из атмосферы частиц пыли, образующихся во время дробления с целью извлечения полезной компоненты

(АОЗТ «Механобр Инжиринг», 2001) и транспортировки добываемой породы.

Ассоциация элементов образует слабоконтрастную аномалию в центральной части, где находится городская жилая застройка и ковровый завод с ТЭЦ. Локальные коэффициенты концентрации составляют для Bi – 19, Cd – 6, Cu, Mo, As, Sb – 1,3-2. Источником ТММ в аномалии является пыль горно-обогатительного 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 (табл. 8).

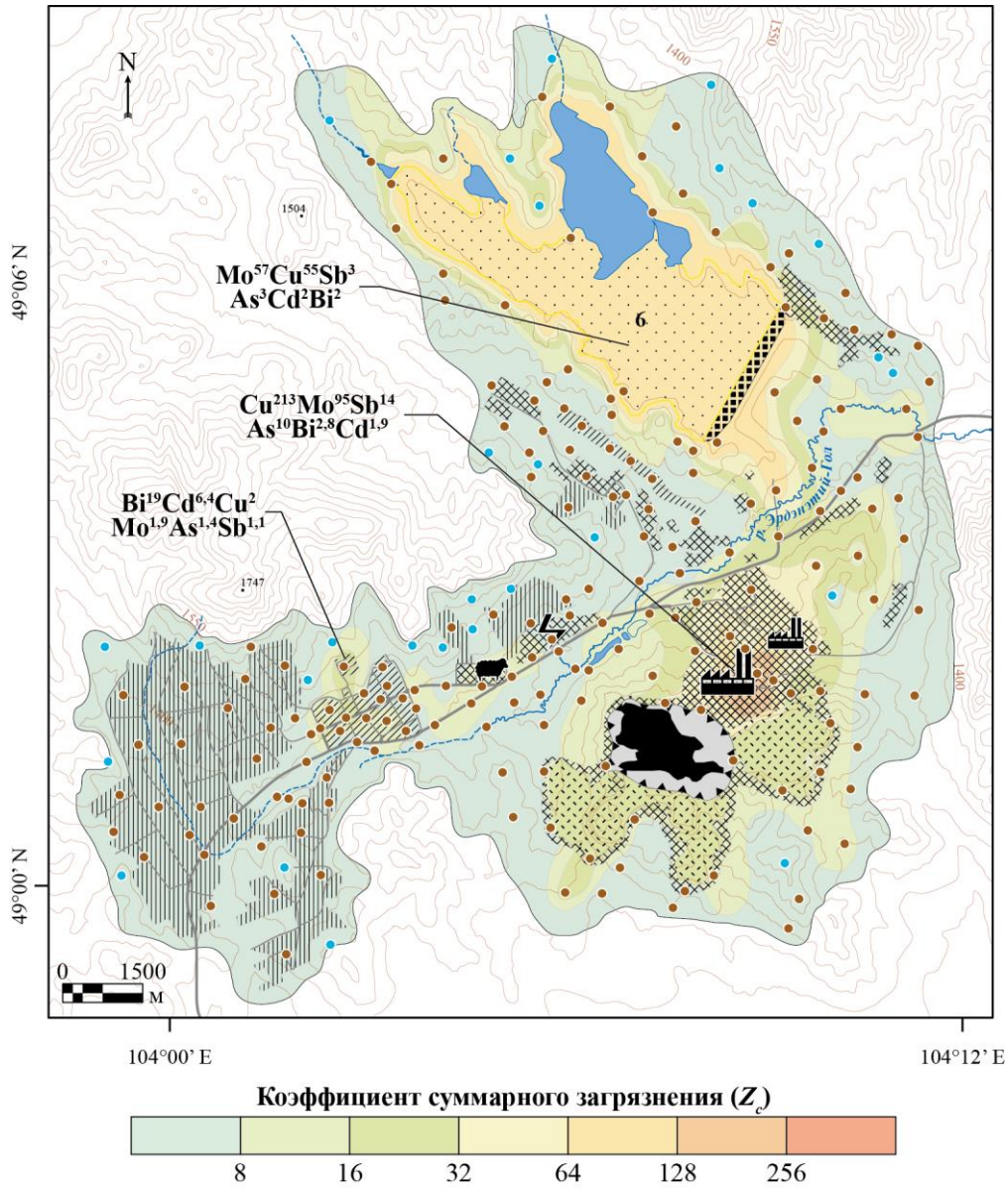


Рис. 21. Распределение суммарного показателя загрязнения (Z_c) I парагенетической ассоциации в поверхностном слое почв Эрдэнэта. В верхнем индексе элементов указан EF_l . Хвостохранилище: 6 - Эрдэнэтское

Вторая парагенетическая ассоциация Cr–Ni–V–Co имеет совершенно иной характер распределения (рис. 22 А). Концентрации элементов довольно однородны (C_v = 8-17%) и близки к фоновым – локальные коэффициенты концентрации равны 1-2,6. Это обусловлено преобладаю-

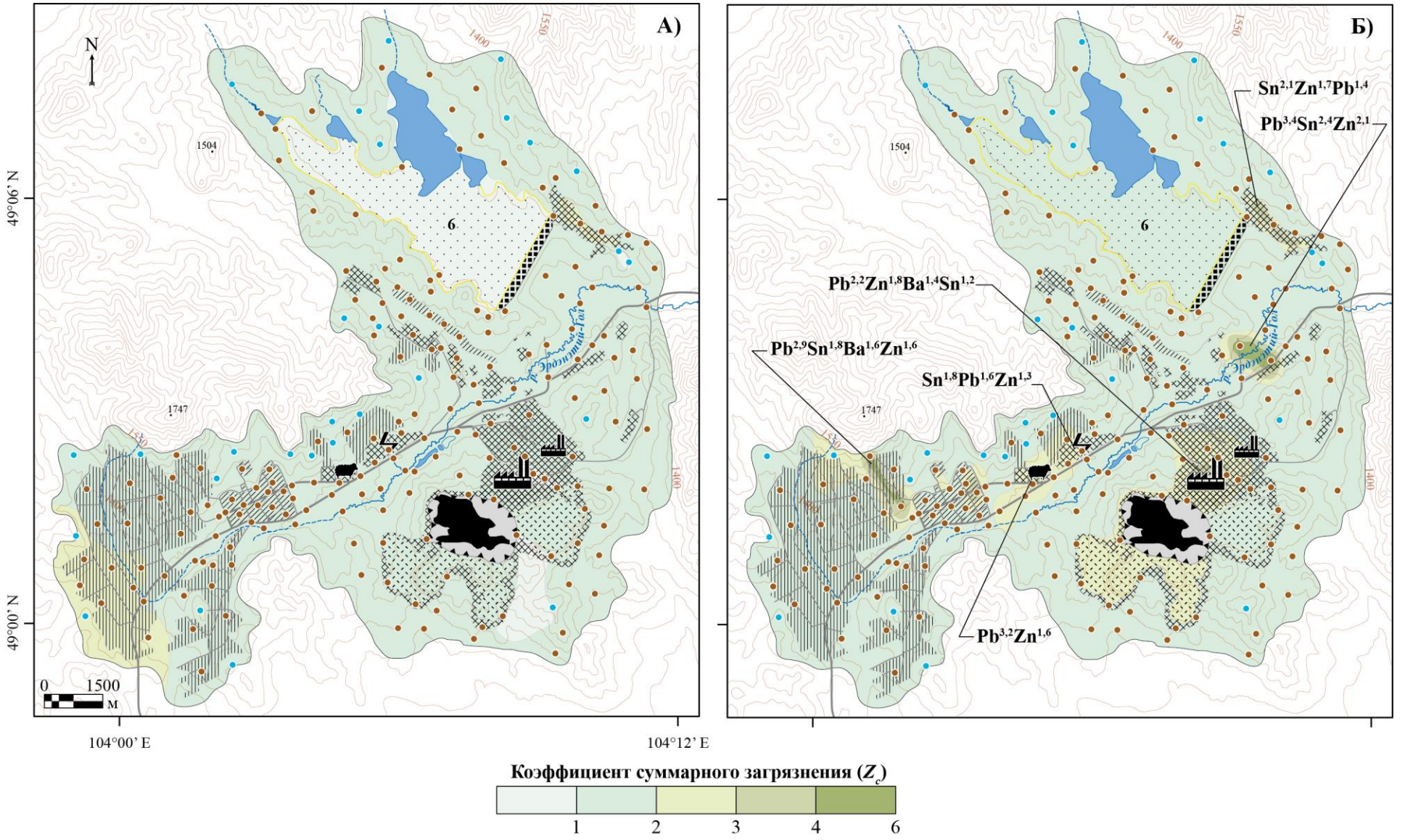


Рис. 22. Распределение частных суммарных показателей загрязнения (Z_c) II (А) и III (Б) полиэлементных парагенетических ассоциаций ТММ в поверхностном слое почв Эрдэнэта. В верхних индексах элементов указаны EF_l . Хвостохранилище: 6 - Эрдэнэтское

щим на первом этапе формирования Селенгинского комплекса амфиболовым габбро и диоритам с повышенным содержанием V–Co–Cr–Ni (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Низкое содержание элементов в хвостохранилище – с локальными коэффициентами рассеяния для Cr – 5,4, V – 3,5, Ni – 2,7, Co – 1,3 – объясняется обедненностью этими элементами порфировых комплексов Эрдэнэтского месторождения (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

Элементы третьей ассоциации Zn–Pb–Ba-Sn накапливаются у северной границы ТЭЦ (рис. 22 Б), где складируется уголь из разрезов Баганур и Шарынгол, который характеризуется превышениями глобальных кларков для угля (Юдович, Кетрис, 2006) 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. Это аномалия заканчивается около коврового завода, который использует красители, содержащие Zn и Pb (Сает и др., 1990).

Менее контрастная аномалия располагается на западе горнопромышленного центра (рис. 22 Б) в селитебной зоне с одноэтажной застройкой (EF_l = 1,6-2,9). Она сформирована из продуктов сгорания бурого угля, который используется для приготовления пищи и отопления юрт. На востоке выявлена зона накопления, приуроченная к свалке (EF_l = 1,7-2,1), ее источником являются продукты сгорания бытовых и строительных отходов. На территории ГОК содержания в поверхностном слое почв Zn, Pb, Ba, Sn превышают фоновые концентрации в 1,8, 2,2, 1,4, 1,2 раза соответственно.

Таким образом, пространственное распределение ТММ полиэлементных ассоциаций в поверхностных слоях почв горнопромышленных центров различно. Типичные для рассматриваемых W-Mo и Cu-Mo месторождений элементы образуют высококонтрастные аномалии в отходах предприятий: Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn и As–Sb–Pb–Mo в аварийном, Барун-Нарынском, Зун-Нарынском и Джидинском хвостохранилищах, превышая фоновые концентрации в 4-356 раз; Cu–Sb–As–Mo–Bi–Cd в Эрдэнэтском хвостохранилище – 2-57. Распределение V, Co, Cr, Ni в обоих горнопромышленных центрах довольно однородно (C_v =8-35%), а значения локальных коэффициентов накопления EF_l < 3. Это обусловлено петрохимическими особенностями пород, преобладающих на первых этапах формирования геологических комплексов рассматриваемых территорий. В долине р. Инкур на территории Закаменска выявлена аномалия Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn, связанная с возобновлением разработки Au-W россыпи. Накопление Zn–Pb–Ba-Sn в пределах Эрдэнэта наблюдается вблизи ТЭЦ и юрточной зоны, что обусловлено использованием бурого угля из разрезов Баганур и Шарынгол с высоким содержанием ТММ по отношению к кларкам, который используется в качестве топлива для отопления и различных бытовых целях.

3.5. Факторы дифференциации почв горнопромышленных центров по содержанию тяжелых металлов и металлоидов

Роль природных и антропогенных факторов, обусловливающих пространственные раз-

личия в уровнях содержания ТММ в поверхностных горизонтах почв, оценивалась путем многомерного регрессионного анализа. Рассмотрено влияние 10 факторов: 1) функциональной принадлежности городских территорий, отражающей особенности антропогенного воздействия на изучаемый ландшафт; 2) почвообразующей породы, определяющей природную геохимическую неоднородность почв; 3) геохимическая позиция элементарного ландшафта; 4-10) физико-химических свойств почв, влияющих на миграционную способность ТММ: реакции среды, содержания Al_2O_3, Fe_2O_3 и MnO, гумуса и гранулометрического состава (количества физической песка и илистой фракции).

Закаменск. По связи с теми или иными факторами все элементы разделяются на три группы. Первая наиболее многочисленна – Bi, Cd, Cu, Sn, W, Zn, As, Mo, Pb, Sb, концентрации которых в почвах горнопромышленных центров контролируются уровнем антропогенного воздействия на изучаемые ландшафты (табл. 9). При увеличении техногенной нагрузки в промышленной зоне по сравнению с жилой дачной застройкой концентрации элементов 1-й группы увеличиваются в 1,5-7,9 раз (рис. 23). Этот же фактор проявляется и в жилой многоэтажной застройке по отношению к халькофильным элементам – Zn, Cd, Sn, As, Mo, Pb (рис. 23 А, В).

Усиление миграционной способности этих элементов объясняется близостью Джидинского хвостохранилища, состоящего из сильнокислых (*pH*=3-3,5) отходов обогащения и сульфидного спецотвала. Из-за прекращения контроля экологического состояния хвостохранилища после закрытия ДВМК произошло высыхание хвостохранилища и активизировалась водная и ветровая эрозия, что вызвало загрязнение прилегающих территорий с жилой застройкой.

Содержание физического песка (частиц диаметром от 0,01 до 1 мм) – второй по значимости фактор для Bi, Cd, Cu, As, Mo, Pb и Sb в почвах промышленной зоны и многоэтажной жилой застройки. Это объясняется тем, что при извлечении W и Mo исходная порода дробилась до частиц размером не более 0,07 мм, которая после отработки складировалась в хвостохранилища. Поэтому с ростом количества физического песка в промышленной зоне возрастают значения средних концентраций ТММ в почвах и ТПО (мг/кг): Pb – до 445, Cu – 209, Mo – 60,5, Bi – 38, Sb – 16,2, As – 12,4, Cd – 9,5. Кроме гранулометрического состава почв на закрепление всех элементов влияют и другие физико-химические свойства – варьирование содержания оксидов Fe и Mn сопровождается изменением концентраций Pb и Zn, гумуса – Sn и W (рис. 23 Б). Для при родно-рекреационной, жилой дачной и транспортной зон, а также фоновых территорий второй по значимости фактор дифференциации почв по содержанию ТММ – их физико-химические свойства, а также ландшафтно-геохимические условия (см. табл. 9). Для Bi и Pb – это приуроченность к геологическим структурам; Cd и Mo – геохимическая позиция; Sb – содержание гумуса; Zn и Cu – концентрации оксидов Al и Fe, соответственно; Sn и As – количество физической глины.

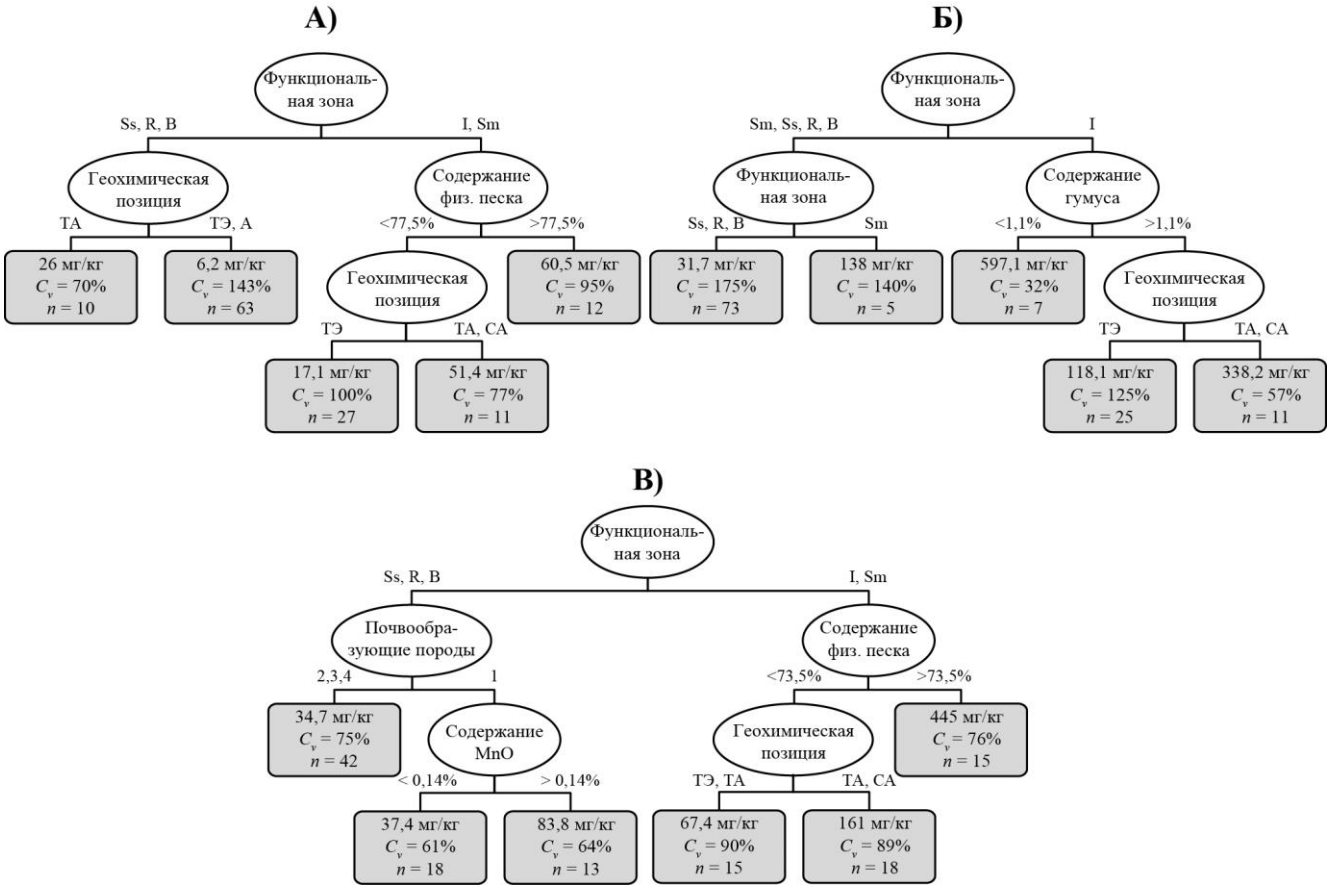


Рис. 23. Дифференциация Mo (А), W (Б) и Pb (В) в поверхностном слое Закаменска в зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средняя концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования *n*. Функциональные зоны: I – промышленная; Sm – селитебная с многоэтажной застройкой; Ss – селитебная с одноэтажной (дачной) застройкой; R – природно-рекреационная; B – фоновые. Геохимическая позиция: А – автономная, ТЭ - трансэлювиальная, ТА – трансакумулятивная, СА – супераквальная. Почвообразующие породы: 1 – аллювиальные отложения; 2 – черноярковская свита; 3 – кембрийский комплекс; 4 – палеозойский джидинский комплекс.

Содержание Co, V, Cr и Ni практически полностью контролируется физико-химическими свойствами почв (см. табл. 9, рис. 24), ландшафтно-геохимические условия имеют второстепенное значение. Наиболее значимый фактор – количество оксидов Fe, поэтому наибольших средних значений Ni (40,4 мг/кг) и V (216) достигают при Fe_2O_3 >4,2%.

Ba и Sr имеют близкое пространственное распределение, однако факторы, оказывающие наибольшее влияние, у них различны. Здесь так же, как и во второй группе, проявляется наибольшая зависимость от физико-химических свойств почв, а влияние функциональной принадлежности и ландшафтно-геохимических особенностей территории выражено гораздо слабее. На пойме и I надпойменной террасе р. Модонкуль в условиях слабокислой и нейтральной реакции среды (*pH* >5,5) и высокого содержания физического песка (> 75%) установлены наибольшие средние значения Sr 397 мг/кг. В природно-рекреационной зоне и на фоновых участках выявлена максимальная концентрация Ba – 914 мг/кг, приуроченная к биогеохимическому (содержание гумуса >8.8%) и сорбционному (содержание илистой фракции > 2,5%) барьерам.

Таблица 9. Влияние антропогенных и природных факторов на распределение ТММ в поверхностных горизонтах почв Закаменска

Факторы		I группа										II группа				Ba	Sr
		Bi	Cd	Cu	Sn	W	Zn	As	Mo	Pb	Sb	Co	V	Cr	Ni		
Функциональная зона		1	1	1, 3	1, 4	1, 2	1	1	1	1	1, 4				5	3	
Почвообразующая порода		2						3, 6	4	2	3		4	4	2, 4	4	
Геохимическая позиция		3	2, 4		4	3		4	2, 3	3	5	4		2, 6	6	3, 4	4
Физико-химические свойства	pH		3-	3-			2-, 3+		5+		4+	5+, 6-	5+	3-	6-	3+, 5+	1+, 3+, 6-
	Гумус, %				2-, 5-	2-, 5-		3+	6-		2+, 3-			3+	3+	2+	4+, 6-
	Al_2O_3, %				3-							3+	3+, 5+, 6+		3+, 4-, 5+	2+, 6+	6-
	MnO, %	3+		4+			2+	3+, 4-		3+		6+		6-	4-	4+, 5+	3-, 6-
	Fe_2O_3, %			2+				3+				1+, 2+, 4+, 6+	1+, 2+, 4+	1+, 2+	1+, 2+, 4+, 5+	4+, 6-	2+, 5+
	Ил, %				2+			2+, 4-	4+				3+, 5+	5+		1+, 6+	
	Физический песок, %	2+	2+	2+	3+, 5+	4+	3+	2+, 5+	2+, 3-	2+	2+	5+, 6-					5+

Примечание. Ранги от 1 до 6 показывают уменьшение значимости фактора, а знаки "+" или "-" прямую или обратную связь соответственно. Для качественных факторов характер связи не определялся.

Таблица 10. Влияние антропогенных и природных факторов на распределение ТММ в поверхностных горизонтах почв Эрдэнэта

Факторы		I группа							II группа								Sr
		Cu	Mo	As	Sb	Zn	Cd	Pb	Ni	Bi	Ba	W	V	Co	Sn	Cr	
Функциональная зона		1	1	1	1	1; 3	1	1		5	3	3	3; 4			4+	
Почвообразующая порода		4			2		5				3		3				
Геохимическая позиция				3; 4	2; 3			4			3; 4	3-	3; 4		3	3	
Физико-химические свойства почв	pH		3-				2-	2-		3-					2-; 4+		1+; 3-
	Гумус, %		2-		3-	2-; 4+	3+; 4+	3-	4-; 5-	3-						3+	2-
	Al2O3, масс. %			3+	4+		5+		1+; 5+	1+	1+; 2+	1+; 2+; 4+		2+		2+; 4+	
	MnO, масс. %	2-; 3-	2-	2-; 4-		2+	4+	2-	2+;5+	4-				3+	3+	1+	4-
	Fe2O3, масс. %	4+	4-	2+				3-	4+	2-		2-	1+; 2+	1+; 2+; 4+	1+; 2+	2+	2+; 5+
	Ил, %			5-			2+; 3+	3+						3+		3+	3-
	Физический песок, %			3-		3+			3-	2-				5-		4+	4+

Примечание. Ранги от 1 до 5 показывают уменьшение значимости фактора, а знаки "+" или "-" прямую или обратную связь соответственно. Для качественных факторов характер связи не определялся.

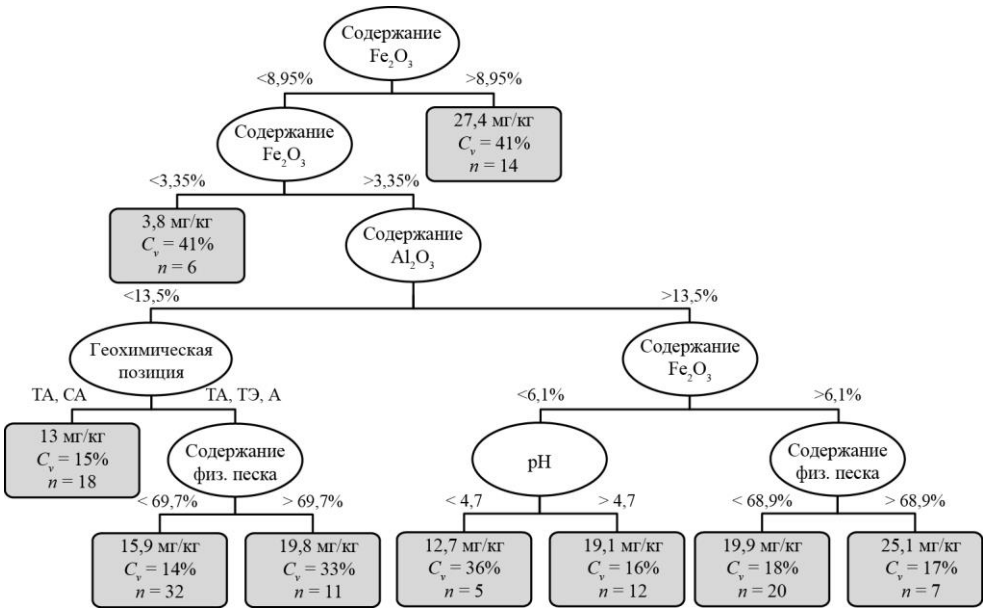


Рис. 24. Дифференциация Co в поверхностном слое Закаменска в зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средняя концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования *n*. Геохимическая позиция: А – автономная, ТЭ - трансэлювиальная, ТА – трансаккумулятивная, СА – супераквальная.

Эрдэнэт. Концентрации Cu, Mo, As, Sb, Zn, Cd, Pb определяются, в первую очередь, степенью техногенной нарушенности территории; а Ni, Bi, Ba, W, V, Co, Sn, Cr, Sr – физико-химическими свойствами почв (табл. 10). Для первой группы элементов увеличение техногенной нагрузки в промышленной и селитебных зонах сопровождается ростом среднего содержания элементов относительно других зон в 1,4-5 раз. Источниками Cu, Mo, Sb и As уже несколько десятилетий являются ГОК «Эрдэнэт», хвостохранилища и ТЭЦ; Zn, Cd и Pb – выбросы автотранспорта и продуктов сгорания бытового мусора (Bontempi и др., 2010). В пределах отдельных функциональных зон аккумуляция элементов группы контролируется почвенными свойствами: *pH* (Cd, Pb), гумусом (Zn), оксидами Fe и Mn (As, Cu, Mo, As, Zn), илистой фракцией (Cd). Исключение составляет Sb, его содержание дифференцировано в зависимости от геохимической позиции и почвообразующей породы.

В качестве примера рассмотрим дендрограмму, характеризующую интенсивность накопления Cu и Mo в поверхностном слое почв от рассматриваемых факторов (рис. 25). Наиболее значимым фактором аккумуляции этих элементов, как отмечалось ранее, является принадлежность к той или иной функциональной зоне. Их наибольшие средние значения 669 и 34,6 мг/кг отмечаются в промышленной зоне, где распространены гранодиоритовая, гранитовая, габбро и диоритовая свиты пермского селенгинского комплекса, являющиеся рудовмещающими породами, что и обусловливает такие высокие концентрации рудных и элементов-спутников. В остальных функциональных зонах вторым по значимости фактором является содержание оксидов Mn, где при снижении его концентрации происходит накопление Cu (191 мг/кг) и Mo (9,3).

Дальнейшая дифференциация Cu зависит от содержания оксидов Fe, ее наибольшее накопление (160 мг/кг) установлено при Fe_2O_3 < 4,5%, а Mo – от содержания гумуса и реакции среды. Источником рудных элементов в почвах являются выпадение тонких частиц из атмосферы, поступающие при эоловом переносе из хвостохранилища и дроблении горной породы в процессе извлечения полезной компоненты. Этот материал, согласно ранее проведенным исследованиям (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010) и собственным результатам анализа хвостов, обеднены MnO, Fe_2O_3, имеют кислую реакцию среды и низкое содержание гумуса.

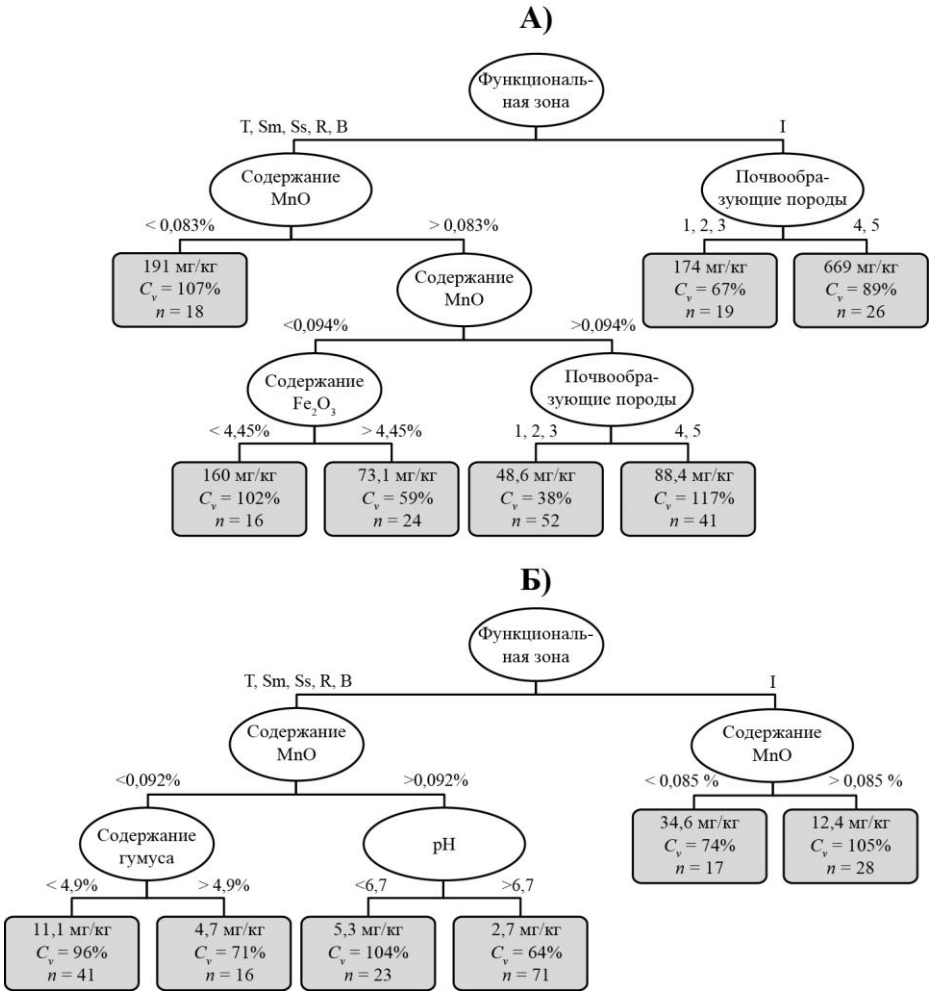


Рис. 25. Дифференциация Cu (А) и Mo (Б) в поверхностном слое Эрдэнэта в зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средняя концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования *n*. Функциональные зоны: I – промышленная; T – транспортная; Sm – селитебная с многоэтажной застройкой; Ss – селитебная с одноэтажной (дачной) застройкой; R – природно-рекреационная; B – фоновые. Почвообразующие породы: 1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – раннемезозойские порфировые интрузивы; 3 – триасовые вулканичесская свита и суб-вулканические интрузивы; 4 – гранодиоритовая и гранитовая свита пермского селенгинского комплекса; 5) габбро и диоритовая свита пермского селенгинского комплекса.

Вторая группа ТММ накапливается в основном (табл. 10) с оксидами Fe (Ni, Bi, Ba, W); Mn (V, Co и Sn); Al (Cr). Фиксация происходит главным образом в виде новообразований, например, Fe-Mn-ортштейнов (Водяницкий, 2005), а также различных минералов (магнетита,

маггемита, гетита, гематита, лепидокрокитов и др.). Дополнительное количество оксидов Fe поступает в почвы с крупными частицами отходов ГОКа, что не противоречит данным других авторов (Васильев, Чащин, 2011; Глазовская, 1988; Дуров и др., 2009). Связь между содержанием оксидов и всех рассматриваемых элементов положительная, причем с ростом содержания оксидов концентрации ТММ возрастают в 1,2-1,4 раза.

Единственным элементом, не вошедшим ни в одну из групп, является Sr, распределение которого в поверхностных горизонтах почв горнопромышленных центров зависит в первую очередь от реакции среды, некоторые влияние оказывают также содержание гумуса, оксидов Fe, илистой фракции. Связь с *pH* положительная, т.е. в щелочных условиях накопление Sr максимально (406 мг/кг).

Таким образом, пространственные различия в уровнях содержания Cd, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Sb в поверхностных горизонтах почв и ТПО Закаменска и Эрдэнэта обусловлены в основном уровнем техногенной нагрузки, варьирующей в зонах различного функционального назначения, и в меньшей степени – природными особенностями. В обоих горнопромышленных центрах дифференциация Co, V, Cr, Ni зависит от изменения физико-химических свойств почв – содержания оксидов Fe, Al, Mn, а Sr – от реакции среды. Поведение Bi, Sn, W характеризуется индивидуальными особенностями в каждом из рассматриваемых горнропромышленных центров, в пределах Закаменска оно в большей степени зависит от функциональной зоны, а в Эрдэнэте – от количества оксидов Al и Fe.

Выводы

1. Поверхностные горизонты фоновых почв вблизи Закаменска и Эрдэнэта имеют W-Mo-Bi-Sb (EF_g = 2,4-20,2) и Mo-Sb-Sr-As (1,6-5,1) 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. В Эрдэнэте, в отличие от Закаменска, проявляются и петрохимические особенности морфоструктур – приуроченность к As геохимической провинции (EF_g = 1,5-1,9).

2. В поверхностных горизонтах почв горнопромышленных центров по сравнению с фоновыми из-за физического и химического выветривания хвостохранилищ и технологических особенностей извлечения полезных компонентов из горной породы увеличивается концентрация ТММ: в Закаменске – Bi, W, Cd, Pb, Mo, Sb, Zn, Cu; в Эрдэнэте – Mo и Cu. Набор элементов-приоритетных загрязнителей напрямую зависит от характера и уровня антропогенной нагрузки. В обоих горнопромышленных центрах наиболее техногенно-нарушенными являются почвы промышленной зоны: в районе ДВМК накапливаются $Bi^{23,6}W^{21}Cd^{10,8}Be^{8,1}Pb^{8}Mo^{6,9}Sb^{6,6}$

$Cu^{3,1}Zn^{2,9}Sn^{2,1}As^{1,7}$, а в районе ГОК «Эрдэнэт» – $Mo^{10,7}Cu^{10,6}As^{1,6}Sb^{1,5}W^{1,5}$. Минимальные значения локальных коэффициентов концентрации приурочены к природно-рекреационной зоне Закаменска –$Bi^{4,3}Mo^{3}W^{1,6}Pb^{1,5}$ и пастбищам Эрдэнэта – $Mo^{1,9}Cu^{1,9}$.

3. Выявлены парагенетические ассоциации ТММ, обладающие сходным поведением и распределением в поверхностных горизонтах почв. Устойчивые 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. Пространственное распределение V, Co, Cr, Ni в горнопромышленных центрах однородное (C_v =8-35%). Особенностью дифференциации Zn–Pb–Ba-Sn в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» является формирование аномалий в юрточной зоне и у северной границы ТЭЦ, что связано с использованием угля из разрезов Баганур и Шарынгол с повышенными концентрациями As, Sn, Zn, Pb, Sb, Cd, Bi относительно глобальных кларков.

4. По связи с природными или антропогенными факторами все элементы разделяются на три группы. Первая – Cd, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Sb, концентрации которых в поверхностных горизонтах почв и ТПО Закаменска и Эрдэнэта контролируются уровнем антропогенного воздействия, обусловленным функциональной принадлежностью территорий. Вторая зависит от физико-химических свойств почв: Co, V, Cr, Ni – от содержания оксидов Fe, Al, Mn, а Sr – от реакции среды. Уровни содержания третьей (Bi, Sn, W) в зоне влияния ДВМК определяются принадлежностью к функциональной зоне, а в Эрдэнэте – количеством оксидов Al и Fe.

ГЛАВА 4. ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ПОЧВЕННЫХ КАТЕНАХ

4.1. Геохимические особенности почв фоновых катен

Закаменск. В автономных позициях природными типами почв в пределах исследуемых ландшафтов являются горная дерново-таежная, на склонах и в их нижних частях – серогумусовая метаморфизованная, а в подчиненных – аллювиальная (темно-)гумусовая с признаками оглеения в нижней части профиля.

Почвы автономных ландшафтов развиты на кристаллических породах (плагиогранитах, гранодиоритах, диоритах, туфолавах), мощность почвенного профиля 25-35 см. реакция среды вниз по профилю практически не меняется (*pH* 5,4-5,7), распределение органического вещества имеет ярко выраженный поверхностно-аккумулятивный характер – с содержанием $C_{орг}$ от 5-6% в верхних горизонтах до 1,5-2% в нижних. Почвы трансэлювиальных и трансаккумулятивных позиций мощностью 30-100 см имеют более кислую, чем горная дерновая реакцию среды (*pH*=5,1-4,9), содержание гумуса $C_{орг}$, как и в автономных позициях, распределено по поверхностно-аккумулятивному типу – 7,0, 1,3 и 0,2% в гумусово-аккумулятивном, иллювиальном и переходном к почвообразующей породе горизонтах соответственно. В подчиненных позициях формируются аллювиальные (темно-) гумусовые слоистые почвы мощностью 80-100 см. Реакция среды в гумусово-аккумулятивных горизонтах – как поверхностном, так и погребенном – нейтральная (*pH*=5,5-5,6), содержание $C_{орг}$ 4,4-6,2%; для иллювиальных горизонтов характерна слабокислая реакция (*pH*=5,1-5,3) с уменьшением $C_{орг}$ до 0,75-1,1%. Гранулометрический состав всех фоновых почв характеризуется содержанием физического песка 70-77%, физической глины 20-28%, а ила 2,0-2,8%.

Ненарушенные почвы в различных геохимических ландшафтах характеризовались средневзвешенным в профиле содержанием ТММ (табл. 11). Максимальные средневзвешенные концентрации Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb и Bi (*КК*=1,6-9,2) приурочены к фоновым почвам в автономных ландшафтах (рис. 26 А) со слаборазвитыми почвами (мощность почвенного профиля всего 25-35 см) и содержат большое количество обломков кислых вулканогенных пород (граниты, граносиениты, туфы, ортофиры, кератофиры), которые обогащены этими элементами (Смирнова, Плюснин, 2013). Трансэлювиальная и трансаккумулятивная позиции характеризуются наибольшими средними значениями в почвах соответственно V, Sr, Ba и Cr, W (*КК*=1,5-2,5).

Почвы супераквальных ландшафтов обеднены Zn, Cr, Cu, Ni, As, Co и Sn (*КР*=1,5-2,1), трансэлювиальных – Ni и Cr (2,4 и 2,5), трансаккумулятивных – Ni и Cu (1.5 и 1.7). Содержание всех остальных элементов характеризуется околокларковыми значениями (рис. 26 А).

Таблица 11. Содержание ТММ (мг/кг) в фоновых и техногенно-нарушенных почвах Закаменска и Эрдэнэта

Роды элементарных ландшафтов	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
Фоновая катена вблизи Закаменска																
Э	150	62	26	63	52	407	16,2	240	4,6	0,83	3,0	1,93	980	4,00	30	0,36
ТЭ	157	37	16	21	20	87	7,3	722	1,8	0,16	2,4	0,80	996	2,10	24	0,16
ТА	114	74	13	33	16	55	4,3	443	1,9	0,13	1,9	0,66	703	4,47	18	0,34
СА	89	51	10	31	16	37	3,6	558	1,7	0,20	1,6	0,78	569	2,31	14	0,34
Катены в пределах Закаменска																
Э	177* 130-234	64,6 25-121	20,2 14,9-31,9	30,4 13-54,4	71,3 41-119,3	105,7 66-193,5	7,7 3-17,2	297 120-503	3,1 1-10	0,7 0,1-2,8	11,7 1,2-61,2	1,7 0,7-3,7	561 390-848	12,9 3-53	28,2 11,7-60,9	0,8 0,1-2,9
ТЭ	184 154-284	78,5 34,8-111	19,7 15,7-25,6	38,5 27,6-54,1	57,6 34,3-125,8	97,5 73,1-129,6	7,5 5,9-8,8	325 245-397	2,5 1,4-7,4	0,2 0,2-0,3	2,4 2,1-2,8	1,3 0,9-1,8	648 373-753	9,1 4,8-17,9	26,6 16,2-42,6	0,5 0,2-1,2
ТА	132 107-147	85,2 71,6-101	17,2 14-23,5	43,4 32,1-64,4	82,7 27,4-318	283,7 56,6-1261	6,9 3,6-12,3	335 242-381	5,5 1,4-12,7	5,7 0,1-32,6	3,0 1,8-4,3	5,6 0,7-25,6	692 610-782	45,9 3,4-161,5	113,4 18,8-518,9	3,1 0,3-12,2
СА	85,4 28-156	60,3 7,6-130	9,2 1-17,1	24,7 1,9-71,6	119,2 24,3-475	237,8 63,8-613	7,7 1,3-26,8	229 99-419	148,0 1,6-440,4	3,8 0,2-15,2	6,3 1,7-9,7	24,6 0,6-123,1	509 180-694	331,2 3,6-920	306,2 17,7-913,2	26,9 0,3-61,4
Фоновая катена вблизи Эрдэнэта																
Э	216,3	83	25,3	59,2	30,4	94,9	4,6	806	1,2	0,15	2,2	0,5	638	1,32	14,3	0,14
ТЭ	137,5	41,9	16,5	32,6	33,4	64,8	9	639	1,4	0,17	2,34	0,6	449	1,23	11,4	0,18
ТА	137,4	51,7	16	33	26,1	75,5	11,5	662	1	0,17	2,03	1	699	1,36	16,4	0,2
Катены в пределах Эрдэнэта																
Э	134,9 85-188	29,6 12-52,9	11,5 2,4-21,5	20,8 8,5-38,9	46,6 35,6-54,3	54,9 19,5-83,2	7,3 4,3-12,1	336 90-500	2 1-3,6	0,13 0,09-0,17	1,95 1,4-2,4	0,51 0,4-0,7	304 110-459	0,96 0,5-1,4	9 6,5-11,8	0,11 0,06-0,18
ТЭ	171 134-248	71,8 50-156	18,9 14,4-33,1	46,2 35,2-95,7	93,1 33,8-272	87,3 70-117	14,3 6,2-30	519 325-859	6,1 0,5-19,2	0,19 0,16-0,22	2,87 2-3,4	1,31 0,4-3,3	567 517-607	1,6 0,4-3	18,5 14,7-25,8	0,25 0,08-0,54
ТА	159 123-188	48,7 41,9-60,1	15,1 11,7-19,8	29,8 24,4-42,9	178 42,9-560	86,3 81,8-89,3	16,9 8,6-38,8	420 313-511	13 1,2-45,7	0,24 0,19-0,3	3,1 2,7-3,5	1,8 0,8-4,3	602 519-687	1,7 1,2-3,2	19,8 14,1-31,5	0,25 0,12-0,55
*Кларки литосферы***																
	106	92	15	50	27	75	5,6	270	1,1	0,09	2,5	0,81	628	2,03	17	0,23

Примечание. * в числителе указано средневзвешенное в профиле значение, в знаменателе – min-max; ** для Co, Cu, V, Bi приняты кларки (Hu, Gao, 2008); Zn, As, Pb, Cr, Ni, Sb, Sr, W – (Григорьев, 2009); Cd, Mo, Ba – (Rudnick, Gao, 2003); Sn – (Wedepohl, 1995)

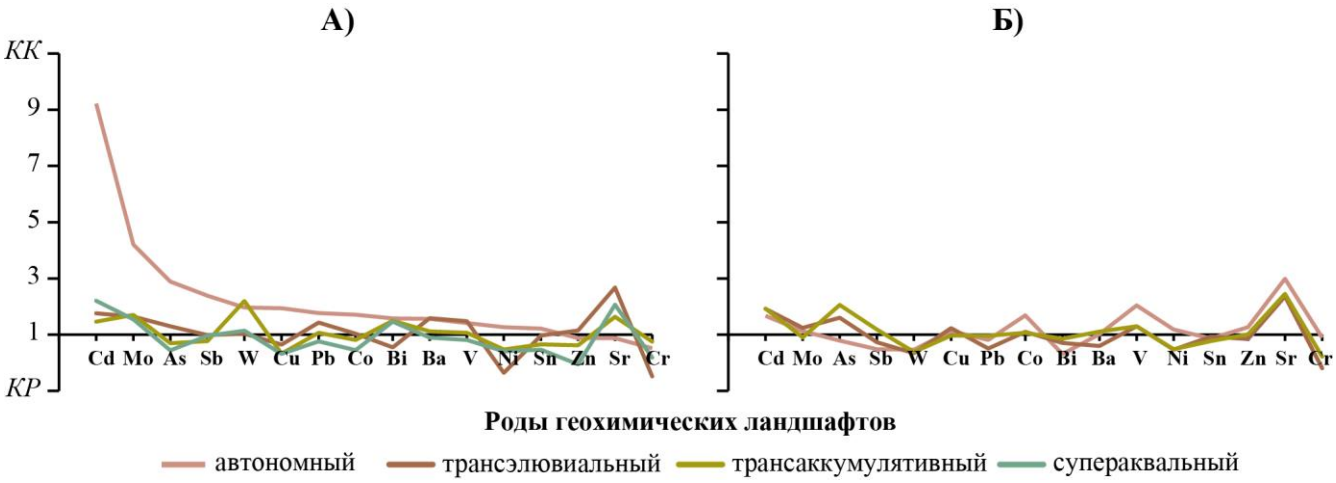


Рис. 26. Геохимические спектры фоновых почв в геохимических ландшафтах вблизи Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б). Элементы ранжированы по убыванию в почвах автономной позиции вблизи Закаменска.

Эрдэнэт. В автономных позициях вблизи Эрдэнэта развита горная каштановая почва (Классификация …, 1977), или литозём светлогумусовый (Классификация…, 2004), на склонах – светло-каштановая, или светлогумусовая аккумулятивно-карбонатная; в нижних частях склона – темно-каштановая, или темногумусовая карбонатная. Супераквальные позиции не выделялись, т.к. все реки в данных природных условиях носят временный характер и пересыхают в летний период. Исключением является р. Эрдэнэтий-Гол ниже ТЭЦ «Эрдэнэт», в которую сбрасываются сточные воды этого предприятия.

В автономных позициях почвы формируются на крупных обломках вулканических пород (гранодиоритов, гранитов, габбро), реакция среды – нейтральная и практически не меняется вниз по профилю (*pH*=7,1-7,2), органическое вещество распределено по гумусово-аккумулятивному типу с $C_{орг}$=4,1% в верхней части профиля и 1-1,2% в нижней. Мощность почвенного профиля 30-50 см. В трансэлювиальных позициях почвы характеризуются близкой к автономным почвам реакцией среды (*pH*=7,2-7,5) и дифференциацией гумуса: наибольшие значения приурочены к верхнему горизонту 3,9% с уменьшением в нижних до 0,8%. Мощность профиля возрастает до 50-100 см.

Темно-каштановые почвы, формирующиеся в основном на четвертичных отложениях, представляют собой комплекс чередующихся слоистостей каменистых обломков различных размеров (от 1 до 25 см в диаметре), песчаных и супесчаных отложений, реакция среды изменяется от слабощелочной (*pH*=7) в верхних горизонтах до щелочной (*pH*=9,2) в нижней. Мощность профиля варьирует от 60 до 100-110 см. Органическое вещество распределено по поверхностно-аккумулятивному типу с максимумом 2,5-3% в гумусово-аккумулятивном горизонте и 0,8-0,9% в нижней части профиля. Гранулометрический состав всех фоновых почв характеризуется содержанием физического песка 72-77%, физической глины 19,5-25,2%, а ила 2,8-3,5%.

Наибольшие средневзвешенные концентрации V, Cr, Co, Ni, Zn, Sr и W выявлены в фоновых почвах автономных ландшафтов (табл. 11), унаследовавших микроэлементный состав почвообразующих пород, обогащенных этими элементами (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Так, содержание Sr в гранодиоритах, гранодиорит-порфирах, адамеллит-порфирах и др. в районе Эрдэнэтского месторождения составляет 1150-810 мг/кг, что в 3,7-2,7 раза превышает кларк кислых пород. Эти цифры соответствуют содержанию Sr в районах Cu-Mo месторождений порфирового типа (Кривцов и др., 2001). Почвы трансэлювиальных и трансаккумулятивных позиций характеризуются наибольшими содержаниями Cu, Mo, Sn и As, Cd, Sb, Ba, Pb, Bi, соответственно.

Концентрации ТММ в фоновых почвах разных элементарных ландшафтов (рис. 26 Б) незначительно отличаются от мировых кларков: *КК* = 1,0-3,0, *КР* = 1,0-2,2. Наибольшие значения *КК* 2,4-3,0 во всех фоновых почвах выявлены у Sr. В автономных ландшафтах почвы обогащены V (*КК*=2,0) и Co (1,7), что обусловлено составом почвообразующих пород, которые представлены амфиболовыми габбро и диоритами, характерными для первого этапа формирования Селенгинского комплекса (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). В трансэлювиальной и трансаккумулятивной позициях отмечено повышенное относительно глобальных кларков содержание As (*КК* 1,6 и 2,1 соответственно) и пониженное – Cr (2,2 и 1,8).

Таким образом, концентрации всех изучаемых ТММ в почвах катен, за исключением рудных, вблизи горнопромышленных центров Закаменска и Эрдэнэта незначительно отличаются от мировых кларков (*КК*=1,0-3,5, *КР*=1,0-2,5), что позволяет использовать полученные значения в качестве локальных геохимических фонов для дальнейших исследований. Причинами различного латерального распределения элементов являются дифференциация физико-химических свойств почв: увеличение содержания органического вещества от автономных к подчиненным позициям; повышенная обводненность супераквальных позиций с пониженным окислительно-восстановительным потенциалом, что влияет на миграционную способность некоторых элементов; варьирование мощности и сформированности почвенного профиля: в автономных ландшафтах профиль представлен слаборазвитыми горными почвами с большим количеством обломков почвообразующих пород в составе горизонта С. Это связано с повсеместным распространением вулканических пород, обогащенных в Закаменске W, Mo, Cd, Bi, Sr, в Эрдэнэте – V, Co, Sr, As.

4.2. Геохимическая специализация почв катен горнопромышленных центров

Степень техногенной геохимической трансформации почв в различных родах элементарных ландшафтов оценивали в Закаменске по данным о 27 разрезах, а в Эрдэнэте – 13 путем расчета локальных коэффициентов концентрации (EF_l) и рассеяния (DF_l) ТММ относительно

фоновых почв, развитых в тех же элементарных ландшафтах (табл. 11). Разрезы расположены в автономных (7 и 3 соответственно), трансэлювиальных (8 и 6), трансаккумулятивных (6 и 4) и супераквальных (7 и нет) ландшафтах. Построенные геохимические спектры, где элементы расположены в порядке убывания в автономных ландшафтах Закаменска, свидетельствуют о значительных техногенных изменениях почв горнопромышленных центров.

Закаменск. В пределах Закаменска почвенный покров представлен типичными природными почвами с измененными из-за техногенного воздействия физико-химическими свойствами. В трансаккумулятивных и супераквальных ландшафтах произошло подкисление почвенного профиля (*pH*=4,5-5,6) и увеличение количества физического песка (до 95%). В пределах хвостохранилищ и прилегающих территорий формируются арти- и токсииндустраты, в профиле которых присутствуют искусственные насыпные горизонты из нетоксичного и токсичного материалов, соответственно. Они характеризуются большой мощностью (до 120-140 см), сильнокислой реакцией среды (*pH*=3-4,6), недифференцированным по профилю и низким содержанием гумуса (<1%), пониженным содержанием Fe_2O_3 (1-7%), илистой фракции (1-3,4%) и повышенным – физического песка (75-95%).

Почвы автономных ландшафтов, расположенных на водоразделах с глубоким залеганием грунтовых вод и поступлением вещества только из атмосферы, наименее подвержены техногенному воздействию (рис. 27 А). Здесь выявлено небольшое накопление халькофильных Sn, W, Bi, Zn (EF_l =1,6-3,9) и рассеяние As, Ni и Sr (DF_l =1,7-2,1). Близкими геохимическими характеристиками, но с более контрастными значениями коэффициентов и более широким перечнем элементов, обладают почвы трансэлювиальных позиций, куда вещество поступает не только из атмосферы, но и с боковым твердым и жидким стоком, и где накапливаются W, Bi, Cu, Cr, Ni и Sb (EF_l =1,6-4,3).

В трансаккумулятивных ландшафтах Закаменска (рис. 27 А) происходит частичная аккумуляция вещества из автономных и трансэлювиальных ландшафтов и почвы интенсивно накапливают Cd (EF_l=43), W, Bi, Sb (8,5-10,3), Pb, Zn, Cu, Mo (2,9-6,3). Здесь расположены Джидинское хвостохранилище, а также бóльшая часть промышленных предприятий города, в т.ч. ТЭЦ, работающая на мазуте, минеральные компоненты которого включают соединения V, Ni, Cr, Mo, Pb, Cu (Новоселов, 1983; Сает и др., 1990; Pacyna и др., 2007), и завод «Литейщик» по переработке цветных металлов. Выбросы предприятий этого профиля, согласно данным (Сает и др., 1990; Benin и др., 1999; Fernandez-Camacho и др., 2010; Goix и др., 2011; Mico и др., 2006), содержат W, Sb, Mo, Pb, Cu, Cr. Источником ТММ может служить также выбросы автотранспорта (табл. 8).

Наиболее сильному техногенному воздействию подвержены почвы супераквальных ландшафтов (рис. 27 А). Их приоритетными загрязнителями являются W, Mo, Bi (EF_l=80-143),

Sb, Pb, Cd (19-32), Cu, Zn, Sn (3,8-7,4). Здесь расположены вторичные источники загрязнения окружающей среды в виде складированных отходов ДВМК: Барун-Нарынское, Зун-Нарынское и аварийное хвостохранилища, материал которых обогащен этими элементами (Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002). В результате размыва Барун-Нарынского хвостохранилища и последующего руслового транспорта слагающего его материала в северной части горнопромышленного центра произошло загрязнение высокой и средней поймы долины р. Модонкуль на протяжении 7,5 км. В месте, где направление течения реки меняется с меридионального на субширотное, на механическом барьере формируется Модонкульское техногенное месторождение, где отлагается транспортируемый материал. В плане оно имеет вытянутую на северо-восток форму площадью 2,5 км^2, сложено в основном мелкозернистыми песками мощностью до 2 м, в разрезе имеет тонкую ритмичную, подобную ленточной слоистость, отражающую периодические крупные разливы в дельте р. Модонкуль (Ходанович, 1999). Материал месторождения обогащен глиной, насыщен сульфидами, содержит повышенные концентрации гюбнерита и шеелита. Переносу сульфидов, а с ними и халькофильных ТММ W, Mo, Bi, Sb, Pb, Cd, Cu, Zn и Sn на значительные расстояния способствует сохранившаяся на поверхности зерен пленка флотореагентов (Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002).

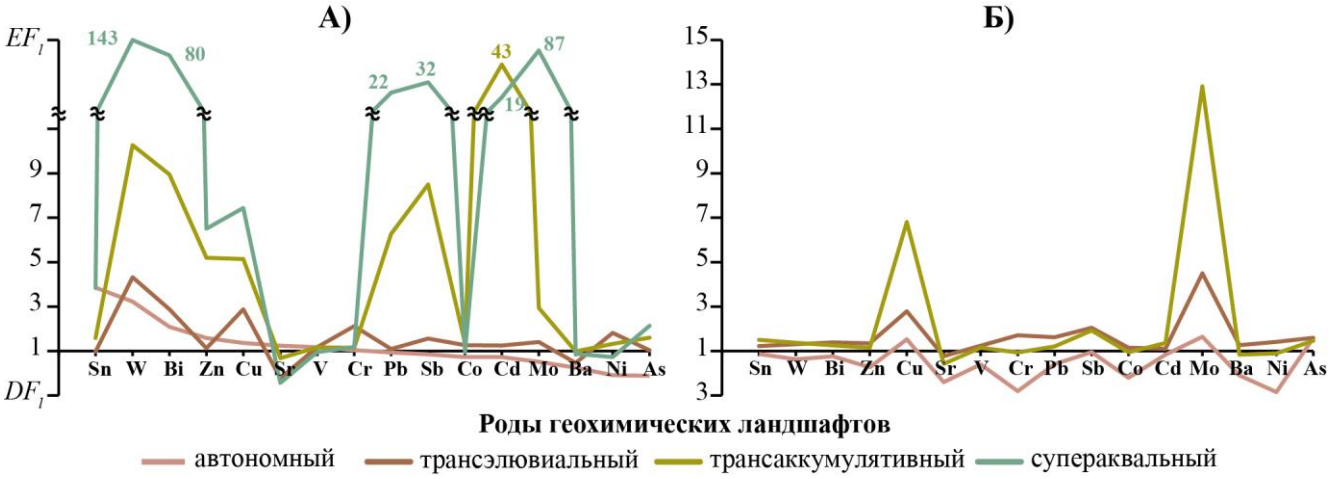


Рис. 27. Геохимические спектры почв горнопромышленных центров в различных геохимических ландшафтах Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б). Элементы ранжированы по убыванию в почвах автономных ландшафтов в Закаменска.

Эрдэнэт. Антропогенное воздействие проявляется в постоянной атмосферной поставке пыли, образующейся при дроблении добываемой породы и развеивании техногенных песков хвостохранилищ. Анализ геохимических спектров для трех выделенных геохимических позиций (рис. 27 Б) показал, что почвы автономных ландшафтов испытывают слабое воздействие: здесь выявлено только незначительно накопление рудных элементов Cu (EF_l =1,5) и Mo (1,6). Наибольшее рассеяние по сравнению с фоновыми почвами характерно для Cr (DF_l =2,8) и Ni (2,8). В светло-каштановых почвах склонов, также как и в автономной позиции, повышено содержание рудных элементов, однако локальные коэффициенты концентрации имеют более кон-

трастные значения, достигая 3,5 для Mo. Для этих условий свойственны также повышенные содержания Sb (EF_l =2,1), Cr (1,7), Pb (1,6) и As (1,6), обусловленные как природными, так и антропогенными факторами. Первые связаны с литогеохимическими особенностями Эрдэнэтского месторождения: оно является сульфидным, что приводит к повышенным концентрациям в почвообразующих породах халькофильных Sb, Pb, As. Содержание Cr повышено в гранодиоритах, гранодиорит-порфирах и адамеллит-порфирах, оно в 4-6 раз превышает мировой кларк (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Большая же часть элементов (Sn, W, Bi, Zn, Sr, V, Co, Cd, Ba, Ni) характеризуются околофоновыми содержаниями (EF_l =1,0-1,4).

Почвы трансаккумулятивных ландшафтов (рис. 27 Б) испытывают наибольший уровень техногенного воздействия, что проявляется в значительном превышении содержания рудных элементов над фоновыми, достигающем для Mo 12,9 и для Cu 6,8 раз. Здесь также происходит аккумуляция Sb (EF_l = 1,9) и Sn (1,5). Так как эти ландшафты соседствуют с хвостохранилищем, то основным источником ТММ в них является вода, просачивающаяся сквозь толщу техногенных песков, обогащенных этими элементами. Еще одним источником загрязнения является приуроченная к этим геохимическим позициям дорожно-транспортная сеть.

Таким образом, в обоих горнопромышленных центрах почвы претерпели значительные техногенные изменения. Наибольшая геохимическая трансформация проявляется в подчиненных позициях: в Закаменске – в супераквальных ландшафтах, где накапливается большая группа халькофильных элементов – W, Mo, Bi, Sn, Pb, Cd и Cu; в Эрдэнэте – в трансаккумулятивных, где выявлено превышение фоновых значений только добываемыми халькофильными рудными элементами Cu и Mo. В Закаменске это не является результатом природных процессов выноса вещества из автономных ландшафтов, а связано с активными процессами латеральной миграции ТММ из хвостохранилищ, расположенных в трансаккумулятивных условиях. В Эрдэнэте это обусловлено в основном петрохимическими особенностями почвообразующих пород и в меньшей степени – влиянием складированных отходов предприятия и аэрогенного загрязнения в результате производственного процесса.

4.3. Латеральное распределение тяжелых металлов и металлоидов в почвах катен

Закаменск. Расчет L_1 по средневзвешенным в профиле концентрациям ТММ в фоновой катене (табл. 12) показал, что распределение всех элементов, за исключением Bi, Sr, Zn, Cr и W, относится к верхне-аккумулятивному типу с наибольшими значениями в автономных ландшафтах (рис. 28). Это связано с природными условиями: почвы имеют малую мощность в результате формирования на кристаллических породах, обогащенных этими элементами; отличаются довольно слабой вариабельностью физико-химических свойств (C_v=4-20 %): пределы колебаний реакции среды – 5,2-6,3, содержания физического песка – 72,3-77,5 %, ила 2,0-2,8%, Al_2O_3

12,2-16,5 %, Fe_2O_3 6,1-9,4 %. Распределение Bi, Cr и W вне-аккумулятивное, т.е. без ярко выраженной зоны аккумуляции, Sr и Zn – срединно-аккумулятивное, с накоплением в трансэлювиальных ландшафтах

В результате активного техногенного воздействия латеральное распределение средневзвешенных значений ТММ в условиях горнопромышленных центров приобрело совершенно иной характер (табл. 12) по сравнению с фоновыми условиями. Халькофильные элементы Cu, Sb, Mo, Pb, Bi и W стали накапливаться в подчиненных позициях – трансаккумулятивных и супераквальных ландшафтах (рис. 28). Наибольшие значения коэффициентов латеральной дифференциации L_1 характерны для рудных элементов Mo (L_1=47,3) и W (25,6) и их спутников Bi (35,3), Sb (14,6), Pb (10,8). Cr, Ni, Sr и Ba под антропогенным воздействием изменили верхне-аккумулятивный тип распределения в фоновой катене на срединно-аккумулятивный в горнопромышленном центре, с накоплением в средней части катены, в трансаккумулятивной позиции. К трансаккумулятивной приурочены ДВМК и Джидинское хвостохранилище, которое оказывает активное воздействие на микроэлементный состав почв в результате процессов выветривания, что неоднократно отмечалось и для других регионов (Anawar и др., 2011; Kohfahl и др., 2010; Meza-Figueroa и др., 2009; Pellegrini и др., 2016).

Таблица 12. Латеральная дифференциация почв фоновых и катен горнопромышленных центров по содержанию ТММ в зоне влияния ДВМК

Условия	Тип дифференциации почв катен по содержанию ТММ			
	верхне-аккумулятивный	срединно-аккумулятивный	нижне-аккумулятивный	вне-аккумулятивный
Коэффициент латеральной дифференциации ТММ, средневзвешенные по профилю концентрации (L_1)				
Фоновые	Cu, As, Sb, Mo, Pb, ***V***, ***Co***, Ni, Ba, Cd, ***Sn***	***Sr***, Zn	–	Bi, Cr, W
Горнопромышленный центр	***V***, ***Co***, ***Sn***	Cr, Ni, ***Sr***, Ba	Cu, Sb, Mo, Pb, Bi, W	As, Zn, Cd
Коэффициент латеральной дифференциации ТММ в поверхностном горизонте (L_2)				
Фоновые	Cr, ***Co***, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sb, Ba, W, Pb, Bi	V, Sn	As, Sr	–
Горнопромышленный центр	V, ***Co***, Sn	As, Cr, Ni, Sr, Ba	Cu, Mo, W, Bi	Zn, Cd, Sb, Pb

Примечание. Курсивом выделены элементы, имеющие одинаковую латерально-миграционную дифференциацию в фоновых и почвах горнопромышленных центров.

Zn-Cd имеют вне-аккумулятивный тип дифференциации. Это можно объяснить тем, что трансэлювиальные позиции занимает природно-рекреационная зона с лиственничными и березовыми лесами, где техногенное воздействие минимально. В супераквальной располагаются завод «Литейщик», ТЭЦ и дорожно-транспортная сеть, влияние которых не столь значительно, как у ДВМК и мест складирования отходов. Пространственное распределение анионов V, Co и Sn в горнопромышленном центре по сравнению с фоном никак не изменилось.

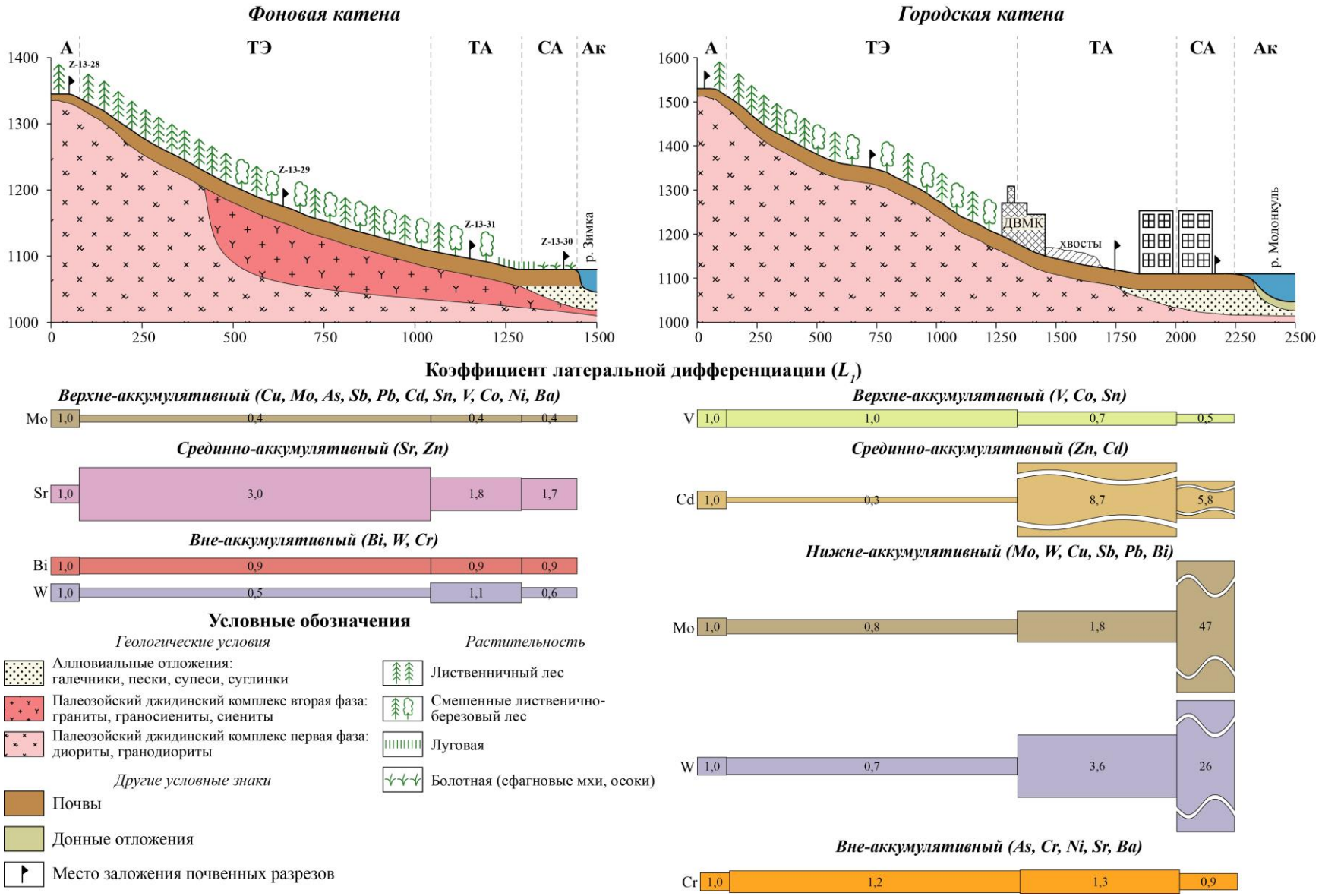


Рис. 28. Фоновая и городская катены вблизи Закаменска. Элементарные ландшафты: А – автономный; ТЭ – трансэлювиальный; ТА – транссаккумулятивный; СА – супераквальный; Ак – аквальный.

Анализ дифференциации ТММ в поверхностном горизонте почв фоновой катены показал, что все элементы, за исключением As, Sr, V, Sn, имеют верхне-аккумулятивный тип распределения (табл. 12). Наибольшую контрастность имеет As. В отличие от осредненного по профилю значения, гумусово-аккумулятивный горизонт почвы в супераквальном ландшафте отличается значительным накоплением этого металлоида (L_2=13,9), чему способствуют его физико-химические свойства: высокое содержание гумуса (более 15 %) и оксидов Fe, восстановительные условия, тяжелый гранулометрический состав (Bhattacharya и др., 2007; Bissen, Frimmel, 2003; Gough и др., 2006; Kabata-Pendias, 2011; Violante и др., 2008). В условиях горнопромышленного центра распределение ТММ в поверхностных горизонтах почв аналогично осредненному по профилю: V, Co, Sn имеют верхне-аккумулятивный тип распределения; As, Cr, Ni, Sr, Ba – средне-аккумулятивный; Cu, Mo, W, Bi – нижне-аккумулятивный;Zn, Cd, Sb, Pb – вне-аккумулятивный. Наибольшие значения коэффициента латеральной дифференциации Mo (L_2=44,5), Bi (24,9), W (22,3) характерны для супераквальных позиций, Sb (17,4) и Pb (13,7) – для трансаккумулятивных.

Специально следует отметить усиление контрастности латерального распределения ТММ – если в фоновой катене геохимические различия между ландшафтами, рассчитанные по средневзвешенным значениям, не превышали 2-3 раз, то при техногенном воздействии они возросли на порядок.

Эрдэнэт. Латеральная дифференциация V, Cr, Co и Ni в почвах фоновой катены относится к верхне-аккумулятивному типу, что обусловлено распространением в автономных ландшафтах амфиболовых габбро и диоритов, обогащенных этими элементами (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010). Большая часть халькофильных элементов (Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, W) имеет вне-аккумулятивный тип распределения (табл. 13), что свидетельствует о слабой интенсивности процессов их латеральной миграции в условиях семиаридных ландшафтов при отсутствии техногенного воздействия. Накопление в трансаккумулятивных ландшафтах свойственно As, Sb и Bi, что обусловлено физико-химическими свойствами почв: более высоким содержанием гумуса (до 5,5%) и более щелочной реакцией среды (*pH* до 8,4) по сравнению с автономными ландшафтами. При этом различия между элементарными геохимическими ландшафтами невелики, значения L_1 для всех ТММ находятся в диапазоне 0,5-1,6.

В условиях горнопромышленного центра латеральное распределение ТММ кардинально преобразовалось по сравнению с фоновыми условиями: все халькофильные элементы Cu, As, Mo, Sb и Pb, свойственные породам Эрдэнэтского комплекса и Cu-Mo штокверковых месторождений, накапливаются в подчиненных условиях – трансаккумулятивных ландшафтах, что свидетельствует об нижне-аккумулятивном типе распределения. Наибольшие значения коэффициентов латеральной дифференциации L_1 характерны для рудных элементов Mo (L_1=6,4), Cu

(3,8) и их спутника Sb (3,6). Элементы V, Zn, Cr, Ni, Co и Sr в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» изменили верхне-аккумулятивный тип распределения на срединно-аккумулятивный. Это вызвано эоловым переносом тонких частиц: с поверхности хвостохранилища, промышленной площадки ГОК «Эрдэнэт», отвалов вскрышных пород и отстойников ТЭЦ.

Таблица 13. Латеральная дифференциация почв фоновых и катен горнопромышленных центров по содержанию ТММ в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт»

Условия	Тип дифференциации почв катен по содержанию ТММ			
	верхне-аккумулятивный	срединно-аккумулятивный	нижне-аккумулятивный	вне-аккумулятивный
Коэффициент латеральной дифференциации ТММ, средневзвешенные по профилю концентрации (L_1)				
Фоновые	V, Cr, Co, Ni	–	***As***, ***Sb***, ***Bi***	Cu, Zn, Sr, Mo, Cd, Sn, W, Ba, Pb
Горнопромышленный центр	–	Cr, Co, Ni, Sr	Cu, Zn, ***As***, Mo, Cd, Sn, ***Sb***, Ba, W, Pb, ***Bi***	V
Коэффициент латеральной дифференциации ТММ в поверхностном горизонте (L_2)				
Фоновые	V, Cr, Co, Ni, Sr, Mo, Sb	–	***As***, W	Cu, ***Zn***, ***Cd***, ***Sn***, ***Bi***, Ba, Pb
Горнопромышленный центр	–	Cr, Co, Ni,	Cu, ***As***, Mo, Sb, Ba, Pb	V, ***Zn***, Sr, ***Cd***, ***Sn***, W, ***Bi***

Примечание. Курсивом выделены элементы, имеющие одинаковую латерально-миграционную дифференциацию в фоновых и почвах горнопромышленных центров.

В поверхностном горизонте почв фоновой катены установлено близкое к средневзвешенным значениям латеральное распределение ТММ (табл. 13): V, Cr, Co, Ni, Sr, Mo, Sb имеют верхе-аккумулятвиный тип распределения, As и W – нижне-аккумулятивный, халькофильные Cu, Zn, Cd, Sn Bi, Pb и сидерофильный Ba – вне-аккумулятивный. У As-W установлены наибольшие значения L_2, равные 1,5 и 1,4 соответственно.

В поверхностных горизонтах зоны влияния ГОК «Эрдэнэт» (табл. 13) рудные Cu, Mo и элементы-спутники As, Sb, Pb накапливаются в подчиненных ландшафтах (L_2=1,6-3,4), помимо горно-обогатительного предприятия и мест складирования его отходов активное воздействие оказывают ТЭЦ, дорожно-транспортная и железнодорожная сети. В результате техногенной нагрузки большая группа элементов V, Zn, Sr, Cd, Sn, W, Bi сменила верхне-аккумулятивный тип латерального распределения в фоновых условиях на вне-аккумулятивный в пределах горнопромышленного центра.

Таким образом, в результате техногенного воздействия в пределах горнопромышленных центров происходит смета типа латеральной дифференциации ТММ в сторону большего накопления в подчиненных ландшафтах. Однако данная тенденция в большей степени связана не с природными процессами латеральной миграции, а с наличием источников загрязнения в транссаккумулятивных и супераквальных позициях. У формирующихся полиэлементных ассоциаций халькофильных элементов происходит смена верхне- и вне-аккумулятивного типов распределения в фоновых условиях на нижне-аккумулятивный в пределах горнопромышленного центра.

4.4. Диагностика латеральных геохимических барьеров

Для выявления ведущих природных и антропогенных факторов, определяющих пространственные различия в уровнях накопления ТММ в почвах катен и диагностики латеральных геохимических барьеров (**ЛГХБ**), проведен регрессионный анализ. Рассмотрено влияние следующих факторов: (1) функционального назначения территорий, которое отражает антропогенную нагрузку на ландшафты; (2) почвообразующей породы, определяющей природную геохимическую неоднородность почв; (3) геохимической позиции элементарного ландшафта; (4-10) физико-химических свойств почв, влияющих на миграционную способность элементов: реакции среды, содержания гумуса и оксидов Al, Fe, Mn, гранулометрического состава (количества физического песка и илистой фракции).

Закаменск. Концентрации всех элементов, за исключением Zn и Cd, пространственное распределение которых определяется геохимической позицией, зависят от физико-химических свойств почв (табл. 14). Наиболее значимым фактором оказалось содержание физического песка (частиц размером >0,01 мм): при увеличении его количества в почвенном профиле, достигая значений 95%, повышается содержание Cr, Ni, Cu, W, Pb, Bi. Данная особенность объясняется антропогенным происхождением этой фракции: при извлечении полезной компоненты исходная порода, обогащенная этими элементами, дробится на частицы размером 0,07 мм и менее, часть которых поступает в атмосферу, а при выпадении загрязняет почвы. При отсутствии контроля за состоянием хвостохранилищ произошло их осушение и развитие водной эрозии с перемещением большого количества крупной фракции, содержащей повышенные концентрации ТММ, из мест складирования отходов в подчиненные ландшафты. Таким образом, в супераквальных и трансаккумулятивных позициях сформировался природно-техногенный ЛГХБ – сорбционно-седиментационный, на котором накапливается обогащенный ТММ материал.

Таблица 14. Влияние природных и антропогенных факторов на латеральное распределение ТММ в почвах катен зоны влияния ДВМК

Фактор	Cr	Ni	Cu	W	Pb	Bi	As	Sr	V	Co	Ba	Mo	Sb	Sn	Zn	Cd
Функц.зона										3						
П/п*																
Г/х позиция							3		3						1	1
Al_2O_3		3-					2+						1-			
MnO	2-	2-								2+	1+, 3+	1-				2-
Fe_2O_3			2+					2+	1+, 2+, 3+	1+					2-	
Гумус					2+									1+		
pH		2+						2-							3-	
Физ.песок	1+, 3+	1+	1+	1+	1+	1+							2+			
Ил	2+				2-		1-	1-	4+	2+	2-				2-	

Примечание. Ранги от 1 до 4 показывают уменьшение значимости фактора, а знак «+» или «-» – прямую или обратную связь соответственно, для качественных факторов характер связи не определялся; * п/п – почвообразующая порода.

Содержание As и Sr имеет обратную связь с содержанием ила (коэффициент корреляции $r = -0{,}88$). Поскольку при уменьшении содержания илистой фракции содержание физического песка увеличивается, эти два элемента так же можно отнести к группе ТММ, концентрирующихся на сорбционно-седиментационном барьере.

Вторая группа элементов осаждается на хемосорбционном барьере, который диагностируется по наличию прямой зависимости между содержанием V, Co и Ba и оксидов Fe, Mn и Al. Органоминеральный барьер определяется положительной связью концентраций Sn с органическим веществом. Для Mo, Cd и Sb установлена обратная связь с содержанием оксида Mn и Al соответственно, что свидетельствует о формировании глеевого барьера в условиях повышенного увлажнения и переходе окисной формы Mn^{3+} в менее подвижную закисную – Mn^{2+}.

Результаты регрессионного анализа представлены в виде дендрограмм. На рис. 29 приводятся дендрограммы для Mo, Co, Cu и W, характеризующие интенсивность их накопления в почвенных профилях при различных сочетаниях природных и антропогенных факторов.

Дифференциация рудных элементов Mo и W зависит от одного фактора (рис. 29 А, Г): при снижении содержания оксидов Mn концентрации Mo увеличиваются в 26 раз, а при увеличении количества физического песка концентрации W возрастают в 8 раз. Изменение этих свойств обусловлено техногенезом, при этом роль одного фактора полностью определяет направление процессов латерального перераспределения и накопления ТММ. Закрытие предприятия должно было с течением времени привести к восстановлению деградированных ландшафтно-геохимических систем, но при отсутствии экологического контроля за отходами производства и рекультивационных работ интенсивность воздействия по-прежнему высока из-за постоянного поступления материала хвостохранилищ. Такой высокий уровень «пресса» на ландшафты приводит к тому, что природные агенты не справляются с переработкой поступающего вещества. Подобные явления отмечались и ранее (Солнцева, 1977).

Наиболее значимым фактором аккумуляции Co является содержание оксидов Fe, причем связь прямая (рис. 29 Б). Наибольшие средние значения Co (28,1 мг/кг) отмечаются при $Fe_2O_3 > 8{,}8\%$ и $MnO > 0{,}14\%$, что указывает на формирование хемосорбционного латерального барьера на границе трансэлювиальных ландшафтов с трансаккумулятивными. Почвы вершин и склонов развиты на породах Джидинского комплекса, представленного плагиогранитами, гранодиоритами и диоритами с повышенной ожелезненностью (Смирнова, Плюснин, 2013), а нижних частей склонов – на четвертичных отложениях с низким содержанием Fe, значительно большей мощностью почвенного профиля и более увлажненными условиями, особенно в нижних горизонтах.

При уменьшении содержания оксидов Fe вторым по значимости ЛГХБ является сорбционно-седиментационный, на котором при увеличении содержания ила и оксидов Mn концен-

трируется Co. Некоторое влияние на накопление Co оказывает и уровень антропогенного воздействия: в промышленной зоне его средние значения (20,2 мг/кг) выше, чем в селитебной (15,4) и природно-рекреационной (16,1).

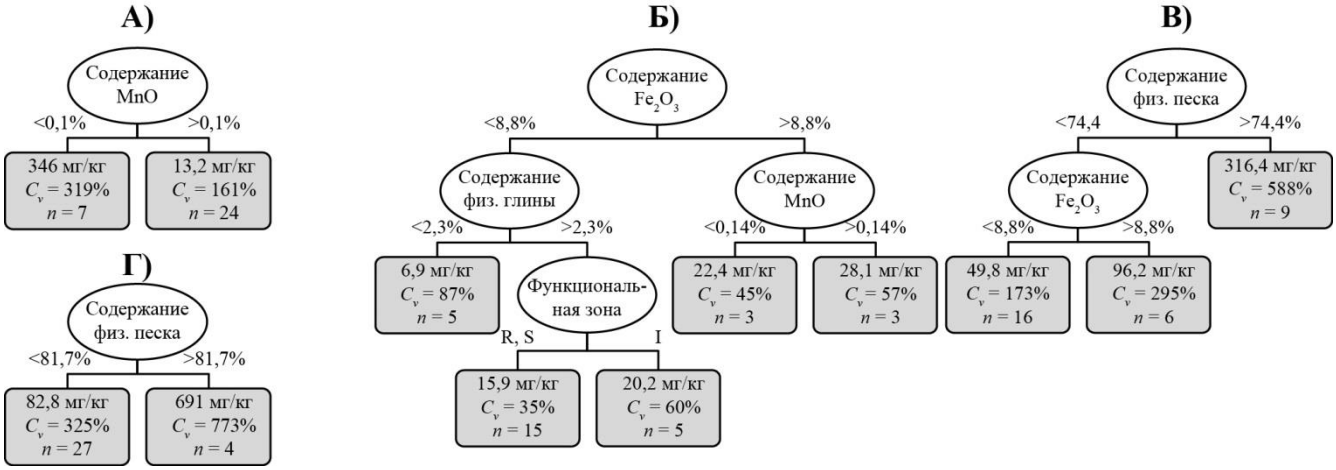


Рис. 29. Дифференциация Mo (А), Co (Б), Cu (В) и W (Г) в почвах катен Закаменска в зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средневзвешенная в профиле концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования *n*. *Функциональные зоны*: R – природно-рекреационная, S – селитебная, I – промышленная.

Совершенное иное распределение имеет Cu (рис. 29 В) – ее максимальные значения (в среднем 316 мг/кг), в 11,7 раз превышающие кларк (Hu, Gao, 2008), наблюдаются на техногенно-природном сорбционно-седиментационном барьере с содержанием физического песка > 74%. Как отмечалось ранее, данный ЛГХБ связан с процессом извлечения полезной составляющей из горной породы и рассеиванием материала хвостохранилищ. С уменьшением содержания физического песка вторым по значимости ЛГХБ становится хемосорбционный: при концентрациях Fe_2O_3 > 8,8% среднее содержание Cu в почвах достигает 96,2 мг/кг, что в 3,6 раза выше кларка. При более низких значениях оксида Fe концентрации Cu всего в 1,8 раза превышают кларк (49,8 мг/кг).

Составление карты ЛГХБ проводилось путем оверлея карт отдельных классов барьеров. При составлении последних использовались градации почвенных свойств, установленные в ходе регрессионного анализа по дендрограммам латерального распределения отдельных ТММ. Для нижних уровней учитывались значения ландшафтных и антропогенных факторов вышележащих уровней. Так, в дендрограмме, характеризующей дифференциацию Co в почвенных катенах Закаменска (рис. 29 Б), хемосорбционный барьер выделялся по содержанию Fe_2O_3 > 8,8% и MnO > 0,14% (1 и 2 уровень дендрограммы), а сорбционно-седиментационный – по содержанию ила > 2,3 % в промышленной зоне (2 и 3 уровни). Для Cu (рис. 29 В) сорбционно-седиментационный барьер определяется повышенным количеством физического песка (>74.4%), а хемосорбционный, также как и для Co, при Fe_2O_3 > 8,8% везде, кроме участков, где

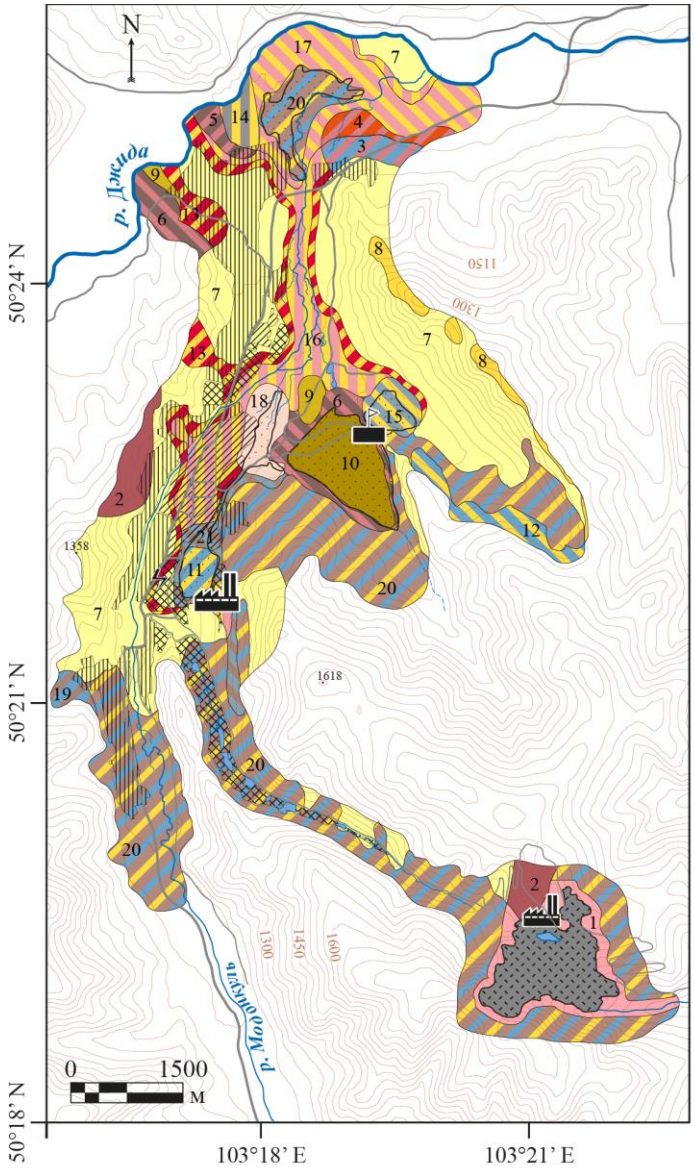
содержание физического песка больше 74,4%.

Критериями выделения барьеров служат значения EF_i>1,7, а класс определялся наличием связи между изменением содержания элемента и того или иного физико-химического свойства почв. Хемосорбционный барьер (HS) определяется по положительной связи между содержанием Fe_2O_3 или MnO и концентрациями элементов, сорбционно-седиментационный (S) – по положительной с количеством ила или физического песка; кислый (E) и щелочной (D) – по отрицательной и положительной, соответственно, корреляции с величиной *pH*; органо-минеральный (O) – по положительной с содержанием органического вещества.

Количество почвенных разрезов для исследуемой территории недостаточно для построения карты ЛГХБ, поэтому основой послужили данные поверхностного опробования, что корректно, т.к. средневзвешенные содержания в профиле имеются значимые коэффициенты корреляции (r = 0,57-0,97) с верхними горизонтами. Результирующая карта характеризует ареалы, к которым приурочены ЛГХБ (рис. 30).

Основными ЛГХБ являются: хемосорбционный, показанный в темно-розовой гамме; сорбционный – в желтой, включающий хемосорбционный и сорбционно-седиментационный; сорбционно-седиментационный – в светло-коричневой. Комплексные барьеры показаны путем наложения на основные второстепенных, изображаемых различными цветовыми штриховками. Наибольшие площади занимают сорбционно-седиментационные, хемосорбционные, щелочные и кислые ЛГХБ. Глеевый барьер, на котром накапливаются Mo, Cd и Sb, имеет локальное распространение в виде узкой полоски вдоль р. Модонкуль и не представлен на карте.

Эрдэнэт. Аккумуляция большинства элементов, за исключением Zn, Cd, Pb, Bi, Sb, Sn и Ba, определяется физико-химическими свойствами почв (табл. 15). Для рудных элементов наиболее значимым фактором является содержание илистой фракции: при увеличении ее количества свыше 5% в почвенном профиле повышается содержание Cu до 500 и Mo – до 43 мг/кг, что превышает кларки (Hu, Gao, 2008; Rudnick, Gao, 2003) в 18,5 и 39 соответственно. Эти участки расположены в трансаккумулятивных ландшафтах на левом берегу р. Эрдэнэтий-Гол, то есть напротив ГОКа, и на правом берегу хвостохранилища. Как и в ДВМК, технология добычи полезной компоненты предполагает дробление исходной породы до частиц размером 0,07 мм и менее на площадке ГОКа, откуда пыль поступает в атмосферу. Вторым источником являются отвалы вскрышных пород, которые подвержены дефляции. Третьим – хвостохранилище, состояние которого, в отличие от расположенных в Закаменске контролируется и, как следствие, не подвержено водной эрозии. Однако с осушенной поверхности ветром в атмосферу поднимаются и развеиваются по территории Эрдэнэта обогащенные ТММ тонкие частицы.



Барьеры		Накапливающиеся элементы	№
Основной	Второстепенные		
HS	-	Mo, Cu, V, Co	1
		Mo, Cu, V, Co, Ba	2
	D	Mo, V, Co, Ba, Sr, Zn	3
	S+E+O	Mo, Pb, Ni, Ba, V, Co, Sr	4
	S+O	Mo, Sb, Pb, Co, Cr	5
		Mo, Sb, Pb, Co, Cr, Ba, Sr	6
HS+S	-	Mo, V, Co, Ba	7
		Mo, V, Co, Ba, As	8
		Mo, Co, Sb, Cr	9
		Mo, Co, Sb, Cr, Ba, Cu, Sr	10
	D	Mo, Co, Sr, Sb, Cr	11
		Mo, Co, Sr, V, Ba, As	12
	E	Mo, Ni, V, Co, Ba	13
	O	Mo, W, Bi, Pb, Cr	14
	O+D	Mo, W, Bi, Pb, Cr, V, Co, Ba, Sr, Zn	15
	O+E	Mo, Pb, Ni, V, Co, Ba	16
		Mo, Pb, Ni, W, Bi	17
S	-	Mo, W, Bi, Ba, Sr	18
	D	V, Co, Ba, Sr	19
	HS+D	Mo, W, Bi, V, Co, Ba, Sr	20
	HS+D+O	Mo, Sb, Pb, Co, Cr, Sr	21

Рис. 30. Латеральные геохимические барьеры Закаменска: HS – хемосорбционный, S – сорбционно-седиментационный; D – щелочной; E – кислый; O – органо-минеральный

В целях борьбы с дефляцией была разработана Программа «Белая пыль», утвержденная министерством окружающей среды Монголии, и с 2007 г. ГОК проводит рекультивационные работы на 18 из 1500 гектаров хвостохранилища (EMC, 2013). Четвертым источником ТММ являются высохшие отвалы золы ТЭЦ на правом берегу реки, которые также подвержены дефляции. Теплоцентраль была создана в 1988 г. с использованием старых технологий, поэтому для нее правомерно использовать результаты исследований гранулометрического состава золы 68 ТЭЦ (Пантелеев и др., 1985). В среднем он на 7-21% представлен илистой фракцией, на 32-84 – пылевидной и 2-59 – песчаной. Эти данные свидетельствуют о том, что в золе ТЭЦ преобладают тонкие фракции, и таким образом, в подчиненных ландшафтах формируется природно-техногенный сорбционно-седиментационный ЛГХБ.

Вторая группа ТММ – V, As, Cr, Ni – осаждается на хемосорбционном барьере. Щелочной барьер, выделяемый по положительной связи между величиной *pH* и концентрацией элементов, является наиболее значимым для Sr и W. Распределение халькофильных элементов Zn, Cd, Pb, Bi и Sb определяется литолого-геохимической неоднородностью почвообразующих пород: наибольшее накопление происходит в почвах на четвертичных отложениях и гранодиоритовых и гранитовых свитах пермского комплекса. Перераспределение Sn и Ba зависит от геохимической позиции: их наименьшие значения приурочены к автономным ландшафтам, а наибольшие – к трансаккумулятивным и трансэлювиальным. В подчиненных ландшафтах эти элементы осаждаются на кислом и хемосорбционном ЛГХБ, соответственно.

Таблица 15. Влияние природных и антропогенных факторов на распределение ТММ в почвах катен зоны влияния ГОК «Эрдэнэт»

Фактор	Cu	Mo	V	As	Cr	Ni	Zn	Cd	Pb	Bi	Sb	Sn	Ba	Sr	W	Co
Функц.зона					2						2					
П/п		2					1	1	1	1	1	3		3		3
Г/х позиция								2	2			1	1, 4			
Al_2O_3			1+										2+			
MnO			3+	1+			2+		2-	2-			3-		2-	
Fe_2O_3					1+	1+				2-				2+		
Гумус			2-			2-										1-, 2-
pH									3-			2+		1+	1+	
Физ.песок				2-	3-											
Ил	1+, 2+	1+														

Примечание. Ранги от 1 до 4 показывают уменьшение значимости фактора, а знак «+» или «-» – прямую или обратную связь соответственно, для качественных факторов характер связи не определялся; * п/п – почвообразующая порода.

На (рис. 31) приводятся дендрограммы, характеризующие интенсивность накопления Cd, Cu и Cr в почвенных профилях при разных сочетаниях природных и антропогенных факторов.

Максимальное содержание Cd (рис. 31 А) свойственно почвам, сформированным на чет-

вертичных отложениях (0,26 мг/кг) и в подчиненных ландшафтах (0,20 мг/кг). Последнее обусловлено однонаправленными потоками вещества из автономных к подчиненным ландшафтам в ландшафтно-геохимических катенах, рассмотренных Н.С. Касимовым и А.И. Перельманом (1999) и М.А. Глазовской (2007).

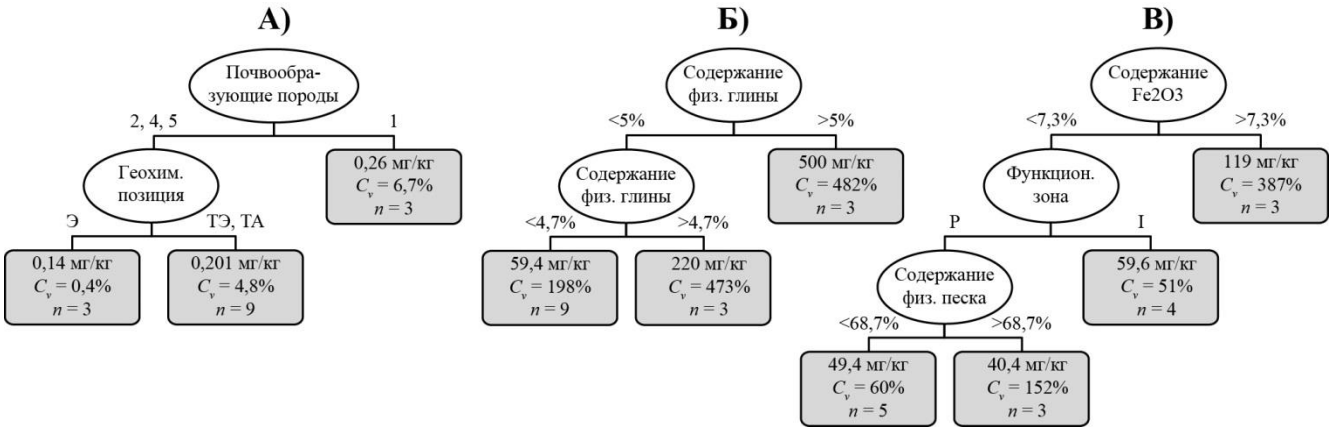
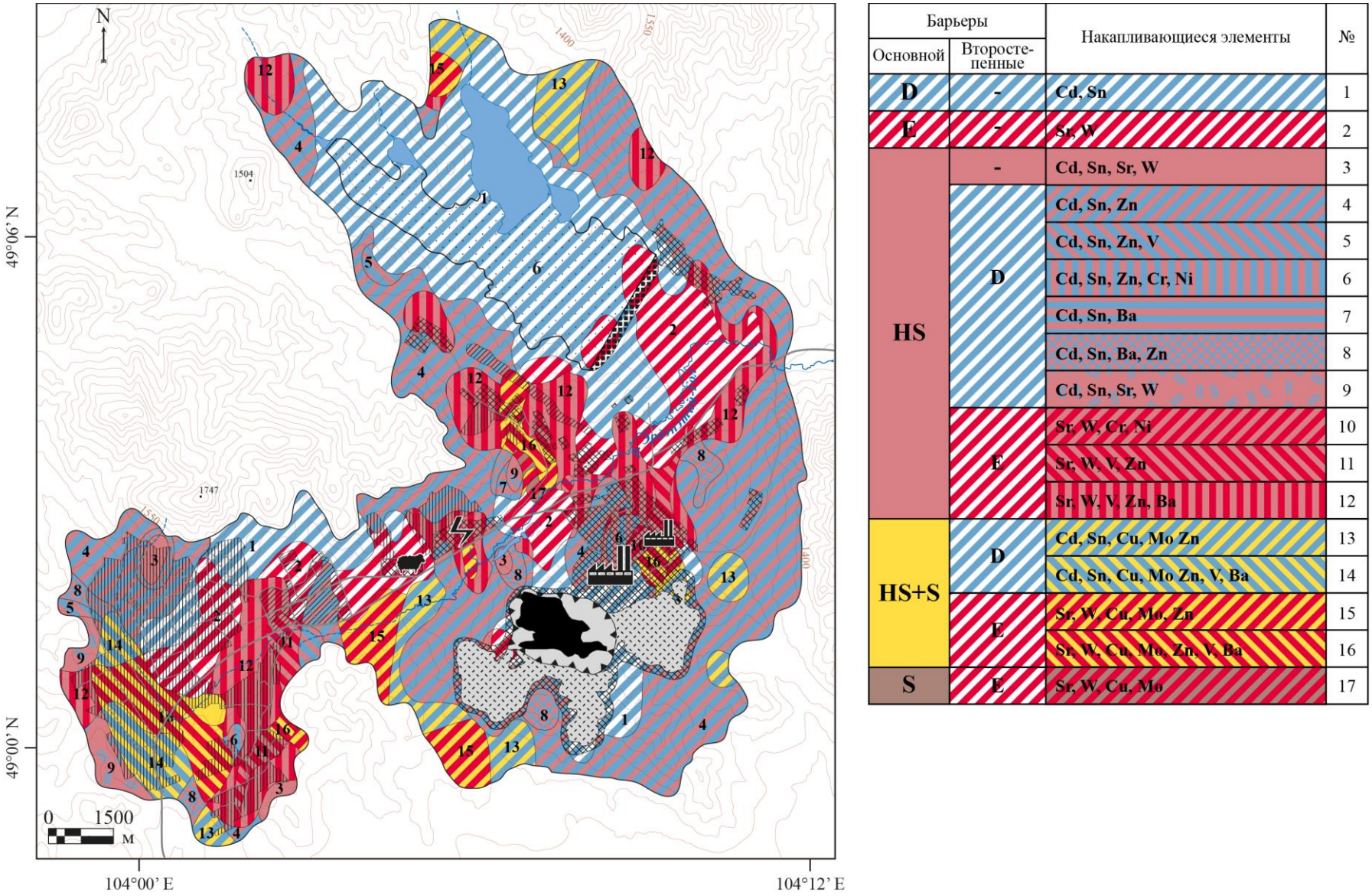


Рис. 31. Дифференциация Cd (А), Cu (Б) и Cr (В) в почвах катен Эрдэнэта в зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средневзвешенная по профилю концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования n. Почвообразующие породы: 1 – четвертичные отложения; 2 – раннемезозойские порфировые интрузивы; 4 – гранодиоритовая и гранитовая свиты пермского селенгинского комплекса; 5 – габбро и диоритовая свиты пермского селенгинского комплекса. Функциональные зоны: I – промышленная, Р – пастбища.

Распределение рудного элемента Cu совершенное иное (рис. 31 Б) – его максимальные концентрации (500 мг/кг) выявлены на сорбционно-седиментационном ЛГХБ, где содержание ила более 5%. Источником Cu, как отмечалось ранее, является деятельность ГОКа и ТЭЦ.

Содержание Cr (рис. 31 Б) увеличивается с ростом концентрации Fe_2O_3, достигая средней величины 119 мг/кг, превышающей кларк в 1,3 раза, на хемосорбционном ЛГХБ. Эти почвы распространены на левом берегу хвостохранилища. При низком содержании оксидов Fe (менее 7,3%) значимое влияние оказывает функциональная принадлежность. Наибольшие значения Cr приурочены к промышленной зоне, однако они значительно ниже кларка. На пастбищах, которые находятся между промплощадкой и хвостохранилищем и оказываются под влиянием аэрального загрязнения, при уменьшении содержания физического песка (<68,7%) в почвах происходит незначительное накопление Cr (49,4 мг/кг).

Карта ЛГХБ Эрдэнэта (рис. 32) строилась так же, как и карта Закаменска. В отличие от зоны влияния ДВМК здесь наибольшее распространение имеют комплексные барьеры: хемосорбционные или сорбционные (HS+S), сочетающиеся с щелочными или кислыми. Щелочные барьеры занимают значительные площади в северной и центральной частях: это участки севернее селитебной зоны с многоэтажной и одноэтажной застройках, хвостохранилище, территория ГОК «Эрдэнэт». Кислые имеют более локальное распространение и приурочены к дамбе хвостохранилища, селитебной зоне с юрточной застройкой, ТЭЦ и северной границе ГОКа.



Барьеры		Накапливающиеся элементы	№
Основной	Второстепенные		
D	-	Cd, Sn	1
E	-	Sr, W	2
HS	-	Cd, Sn, Sr, W	3
	D	Cd, Sn, Zn	4
		Cd, Sn, Zn, V	5
		Cd, Sn, Zn, Cr, Ni	6
		Cd, Sn, Ba	7
		Cd, Sn, Ba, Zn	8
		Cd, Sn, Sr, W	9
	E	Sr, W, Cr, Ni	10
		Sr, W, V, Zn	11
		Sr, W, V, Zn, Ba	12
HS+S	D	Cd, Sn, Cu, Mo Zn	13
		Cd, Sn, Cu, Mo Zn, V, Ba	14
	E	Sr, W, Cu, Mo, Zn	15
		Sr, W, Cu, Mo, Zn, V, Ba	16
S	E	Sr, W, Cu, Mo	17

Рис. 32. Латеральные геохимические барьеры Эрдэнэта: HS – хемосорбционный, S – сорбционно-седиментационный; D – щелочной; E – кислый.

Таким образом, общей чертой изучаемых горнопромышленных центров является формирование природно-техногенного сорбционно-седиментационного ЛГХБ: при увеличении содержания физического песка в Закаменске и ила в Эрдэнэте повышаются концентрации рудных элементов (Mo, W, Cu) и их спутников (Pb, Bi, As, Sr, Cr, Ni), особенно в подчиненных позициях. Изменение гранулометрического состава происходит за счет поступления материала из хвостохранилищ в результате их разрушения под действием современных эрозионных процессов: в первом случае – водной эрозии, переносящий большие массы крупных частиц; во втором – дефляции, которой подвержены преимущественно мелкие частицы пелитовой и алевритовой размерности. Остальные элементы в зоне влияния ДВМК осаждаются на барьерах, имеющих природное происхождение, но с увеличенной под влиянием техногенеза емкостью: на хемосорбционном – V, Co и Ba; глеевом – Mo, Cd и Sb; органоминеральном – Sn. Отличием в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» является формирование щелочного и кислого барьера, где осаждаются Sr, W и Sn, соответственно, а также набор элементов, дифференциация которых определяется литолого-геохимической неоднородностью почвообразующих пород – Zn, Cd, Pb, Bi и Sb.

4.5. Радиальное распределение тяжелых металлов и металлоидов в почвах

Внутрипрофильное распределение валового содержания элементов в почвах оценивали в зависимости от показателя аккумулятивности *S* для ландшафтов горнопромышленных центров. Разрезы, заложенные в пределах хвостохранилищ, не рассматривались, так как на этих участках распространены техногенные, искусственно созданные образования.

Закаменск. Анализ полученных значений (табл. 16) показал, что радиальное распределение ТММ в техногенно нарушенных и природных типах почв схоже. Халькифильные Co, Ni, Cu, As и литофильные V, Sr элементы характеризуются преимущественно слабоэлювиальным типом дифференциации – вынос из верхней части профиля и аккумуляция в нижней. Обратная ситуация с аккумулятивным типом распределения характерна для наиболее распространенных рудных элементов и их спутников в пределах исследуемых участков – Mo, W, Zn, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi, Ba. Внутрипрофильная дифференциация Cr не отличается постоянством.

Эрдэнэт. В районе Эрдэнэта, также как и в Закаменске, радиальная дифференциация ТММ в техногенно нарушенных и природных почвах имеет близкий тип аккумуляции. Общими чертами в двух горнопромышленных центрах является слабоэлювиальный тип распределения группы халькофильных Co, Cu, As и литофильного Sr, и аккумулятивный у Mo, Bi, Sb. Отличительной чертой в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» является смена типа профильного распределения Sn в результате техногенного воздействия с аккумулятивного в фоновых условиях на элювиальный в пределах горнопромышленного центра. Радиальное распределение Ni, V, Cd, Pb, Ba как в природных почвах, так и в техногенно нарушенных не отличается постоянством.

Таблица 16. Число разрезов с разными типами аккумуляции ТММ в фоновых условиях (над чертой) и горнопромышленных центрах (под чертой) в районе Закаменска и Эрдэнэта

Тип профильного распределения	Co	Ni	Cu	As	V	Sr	Mo	W	Pb	Bi	Zn	Cd	Sn	Sb	Ba	Cr
Закаменск (n=4 /20)																
Сильноэлювиальный								-/1		-/1						
Слабоэлювиальный	**4/12**	**2/12**	**2/10**	**3/16**	**3/17**	**4/11**	1/2	1/4	-/2	1/-	1/6	-/3	-/5	1/7	1/6	2/7
Равномерный	-/4	1/2	1/4	-/1	-/1	-/5		-/1	1/-		1/2	-/1	-/2	-/3	2/3	-/5
Слабоаккумулятивный	-/4	1/6	1/6	1/3	1/2	-/4	**3/12**	**3/12**	**2/18**	**1/16**	**2/12**	**3/15**	**3/13**	**3/10**	**1/11**	2/8
Сильноаккумулятивный							-/6	-/2	1/-	2/3		1/1	1/-			
Эрдэнэт (n=4 / 15)																
Сильноэлювиальный																
Слабоэлювиальный	**3/10**	2/6	**2/11**	**3/8**	2/4	**4/10**	1/6	**2/9**	-/6	-/5	1/8	1/6	-/7	1/4	-/1	1/4
Равномерный	1/2	2/7	1/2	1/5	-/5	-/4	-/2	-/3	1/3	-/2	2/4	-/4	1/4	-/5	2/7	0/4
Слабоаккумулятивный	-/3	-/2	1/1	-/2	2/6	-/1	**3/7**	2/3	3/6	**4/8**	1/3	3/5	3/4	**3/6**	2/7	**3/7**
Сильноаккумулятивный			-/1													

Таким образом, в горнопромышленных центрах характер профильного распределения ТММ в техногенно нарушенных и наиболее распространенных в данных природно-климатических условиях фоновых типах почв, схож. Бóльшая часть элементов Mo, W, Zn, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi, Ba в Закаменске имеет аккумулятивный тип радиальной дифференциации, в Эрдэнэте Mo, Bi, Sb распределены по аккумулятивному типу, Zn и Sn – по элювиальному, профильное распределение Ni, V, Cd, Pb, Ba не отличается постоянством.

4.6. Диагностика радиальных геохимических барьеров

Накопление техногенных ТММ внутри почвенного профиля происходит при их водной миграции из отвалов и хвостохранилищ и последующего осаждения на педогеохимических барьерах (**ГХБ**), емкость которых из-за свойств антропогенно измененных почв, как правило, выше, чем у природных аналогов (Водяницкий, 2010; Кошелева, Касимов, Власов, 2015; Никифорова, Кошелева, 2007; Почва, город, экология, 1997; Birke, Rauch, Stummeyer, 2011; Wang, Qin, 2007). Интенсивность накопления ТММ, т.е. контрастность и емкость ГХБ, определяется не только темпами их поступления из техногенных источников, но и прочностью связей с почвенными компонентами (илистыми частицами, оксидами и гидроксидами Al, Fe и Mn, органическим веществом), которая обусловлена химическими свойствами элемента, формами поступающих соединений и геохимической обстановкой (*pH, Eh*) (Водяницкий, 2009; Кошелева, Касимов, Власов, 2015; Кошелева, Касимов, Самонова, 2002; Kabata-Pendias, 2011; Heavy Metals in Soils, 2013).

Поведение ТММ в техногенно трансформированных почвах зависит от комплекса антропогенных и природных факторов, влияющих на их миграционную способность и определяющих скорость накопления на ГХБ. Для выявления наиболее значимых факторов применялся

метод регрессионных деревьев, позволяющий учесть как количественные, так и качественные факторы радиальной дифференциации почвенных профилей по содержанию ТММ. Рассмотрено влияние изменения физико-химических свойств, контролирующих подвижность элементов: реакции среды, содержания гумуса, Al_2O_3, Fe_2O_3 и MnO.

Закаменск. Все исследуемые элементы в зависимости от факторов, влияющих на радиальное распределение ТММ и аккумуляцию на ГХБ, можно разделить на две группы (табл. 17): хемосорбционные и кислотно-основные. Первая выделяется по наличию связи между концентрациями в почве ТММ и полуторных окислов. Аккумуляция на них характерна для большой группы ТММ в виде Fe- и Mn-новообразований в средней и нижней частях профиля: при увеличении Fe_2O_3 осаждаются V (240 мг/кг), Co (26,2), Ba (878), Sr (352); MnO – Bi (81,6), Mo (359), Sn (14), Zn (971), Cd (46,6).

Таблица 17. Влияние природных и антропогенных факторов на радиальное распределение ТММ в почвах зоны влияния ДВМК

Фактор	V	Co	Ba	Sr	Bi	Mo	Sn	Zn	Cd	Cu	As	W	Pb	Sb	Ni	Cr
Al_2O_3		3-		4+					2+		2+				4-, 6-	2-
MnO		3+	2+, 3+, 5+		2+	2+	2+	1+	1+	3+		2+	2+	2+	2+, 4+	4-
Fe_2O_3	1+, 2+, 3+, 4+	1+, 2+, 3+	1+, 3+, 6+	1+	1-	1-	1-			2+	3+				5+	2+, 3+
Содержание гумуса	3+	4-	2+, 4-, 6+	2-, 3-				2-	2+, 3+	2+	2+	2-	2-		3-	
pH	4+, 5+	2+		3+, 4+, 5+	2-	2-	2-	2-		1-, 3+	1-, 3+, 4+	1-	1-	1-	1+, 2+	1+, 4+

Примечание. Ранги от 1 до 5 показывают уменьшение значимости фактора, а знак «+» или «-» – прямую или обратную связь соответственно, для качественных факторов характер связи не определялся.

Во вторую группу вошли Cu, As, W, Pb, Sb, Ni, Cr. Она подразделяется на две подгруппы в зависимости от направления изменения реакции среды (табл. 17). На кислом барьере, выделяемом по отрицательной связи между величиной *pH* и концентрациями элементов, осаждаются Cu (398 мг/кг), As (28,1), W (1286), Pb (931), Sb (100). По обратной зависимости выделяется щелочной барьер, на котором накапливаются Ni (54) и Cr (82,6). Более детально закономерности внутрипрофильного поведения ТММ в зависимости от сочетаний физико-химических факторов можно проследить на дендрограммах, характеризующих интенсивность накопления Mo, W и V в генетических горизонтах почв горнопромышленного центра Закаменск (рис. 33).

Наиболее значимым фактором аккумуляции Mo является содержание оксидов Fe, причем связь с Fe обратная. Максимальное накопление обнаружено в токсииндустратах и прилегающих к хвостохранилищам аллювиальных почвах с содержанием Fe_2O_3 < 4,75 %, в которых накопление Mo (в среднем 359 мг/кг) происходит преимущественно в виде Mn-новообразований, выявленных по положительной связи с оксидами Mn (MnO>0,063%), однако

влияние также оказывают повышенное содержание гумуса (рис. 34). Наименьшие концентрации элемента (13,5 мг/кг) выявлены в верхних горизонтах почв подчиненных ландшафтов (артиндустраты, аллювиальные) и по всему профилю автономных и трансэлювиальных позиций (серогумусовые метаморфизированные и горные дерново-таежные) при кислой и слабокислой реакции среды (*pH*>4,7).

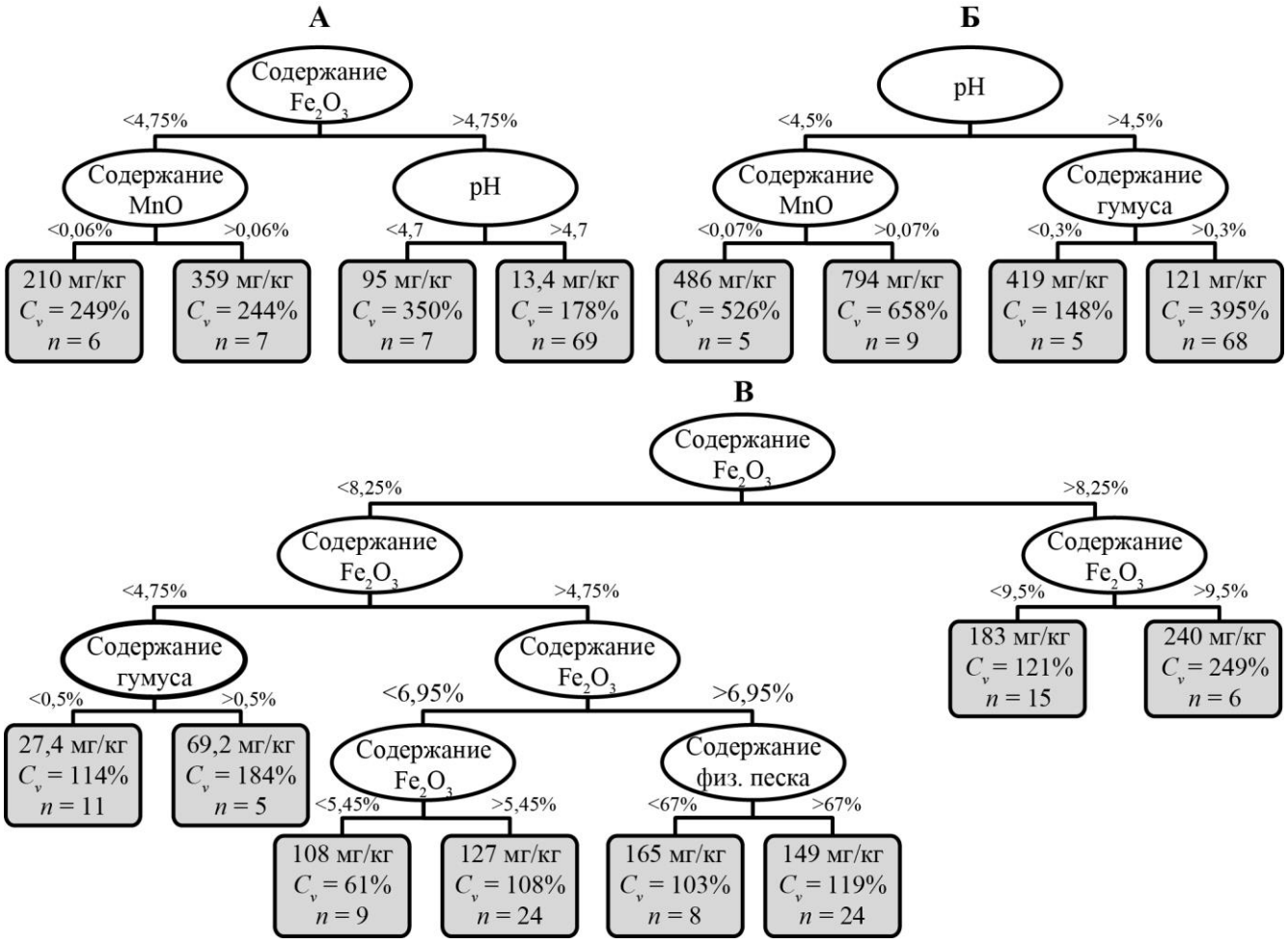


Рис. 33. Дифференциация Mo (А), W (Б) и V (В) в почвах катен Закаменска в зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средневзвешенная по профилю концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования n.

Иное распределение характерно для второго рудного элемента – W. Наиболее значимым фактором аккумуляции W (среднее 694 мг/кг) является реакция среды, причем связь обратная, что свидетельствует о формировании кислого ГХБ, на котором происходит осаждение этого элемента. Вторым по значимости барьером является хемосорбционный, где в условиях сильнокислой среды (*pH* < 4,5) при увеличении концентрации MnO средние содержания W достигают 794 мг/кг.

Наибольшие средние значения V (240 мг/кг) наблюдаются при Fe_2O_3 > 9,5% на хемосорбционном барьере. Такие свойства характерны для иллювиальных (В), переходных от иллювиальных к почвообразующей породе (ВС) горизонтов и непосредственно для почвообразую-

щей породы, которые находятся в условиях наименьшей антропогенной нарушенности в трансэлювиальных и автономных позициях по правому и левому бортам р. Модонкуль. Эти почвы сформировались на породах Джидинского комплекса, представленного плагиогранитами, гранодиоритами и диоритами с повышенной ожелезненностью. При уменьшении содержания оксидов Fe вторым по значимости ГХБ является органоминеральный, где при содержании гумуса более 0,5% накапливается V (69 мг/кг).

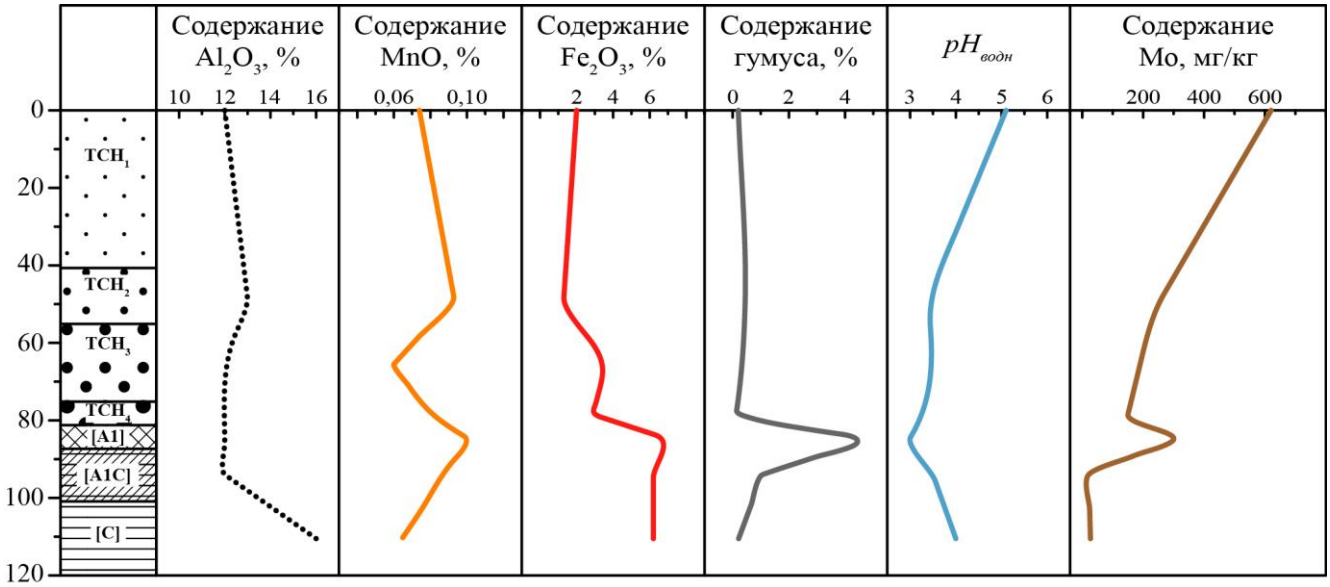


Рис. 34. Профильная характеристика токсииндустратов и радиальное распределение Mo

Таким образом, рассмотренные дендрограммы показывают, что накопление ТММ внутри профиля происходит не на одном барьере, а обусловлено влиянием комплексных, преимущественно хемосорбционных и кислотно-основных ГХБ.

Эрдэнэт. ТММ в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» в зависимости от влияния физико-химических свойств почв на их радиальное распределение можно разделить на три группы (табл. 18). Первая включает ТММ, концентрации которых в карбонатных почвообразующих породах (C_{Ca}), переходных от иллювиального к почвообразующему (*BC*) и погребенных карбонатных гумусово-аккумулятивных ($(A1_{Ca})$) горизонтах имеют обратную связь с содержанием оксидов Mn. При снижении концентрации MnO (< 0,076%) накапливаются халькофильные элементы Cu, Mo, As, Sb, Pb, Bi, W. Вторым по значимости фактором для этой группы является увеличение содержания оксидов Al (>14%). Повышенные содержания этих элементов в нижней части профиля обусловлены не формированием ГХБ, а петрохимическими особенностями почвообразующих пород. Исследования (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010) геохимических особенностей горных пород Эрдэнэтского массива свидетельствуют о повышенном содержании халькофильных ТММ, низких концентрациях оксидов Mn (0,01-0,08%) и высоких – Al (13,7-18,5%).

Таблица 18. Влияние природных и антропогенных факторов на радиальное распределение ТММ в почвах зоны влияния ГОК «Эрдэнэт»

Фактор	V	Cr	Co	Ni	Zn	Sr	Sn	Cu	As	Mo	Sb	Pb	Bi	W	Cd	Ba
Al_2O_3	4+	2-	3-	3-		4-	1+		2+	2+	2+	2+	2+	2+		2+, 4+
MnO	2+, 5+		2+	3+	3+, 4+	4+, 5+	2+	1-	1-	1-, 2-	1-, 3-	1-, 2+, 3-	1-, 3+	1-, 3+	2-	3-
Fe_2O_3	1+, 2+, 3+	1+	1+, 2+	1+	1+, 2+, 5+	1+	3+						2-	2-, 3-	2+	
Сод. гумуса	3-, 4+		3-	3+	3+	2-, 3+	4+	2+		3+			3+		1+	1+
pH		2-		2+	4+	3+, 5+					2-					2+

Примечание. Ранги от 1 до 5 показывают уменьшение значимости фактора, а знак «+» или «-» – прямую или обратную связь соответственно, для качественных факторов характер связи не определялся.

Вторая группа, подобно такой же в Закаменске, включает элементы, накапливающиеся на хемосорбционном барьере: при увеличении Fe_2O_3 осаждаются V (среднее 279 мг/кг), Cr (62), Co (24,7), Ni (41,2), Zn (121), Sr (797); Al_2O_3 – Sn (3,1). Отличительной особенностью Эрдэнэта является наличие группы элементов, имеющих устойчивую связь с содержанием гумуса: на органо-минеральном ГХБ накапливаются Cd (среднее 0,22 мг/кг) и Ba (650). Более детально закономерности внутрипрофильного поведения ТММ в зависимости от сочетаний физико-химических факторов можно проследить на дендрограммах, характеризующих интенсивность накопления Cu, Mo и Cd в генетических горизонтах почв горнопромышленного центра (рис. 35).

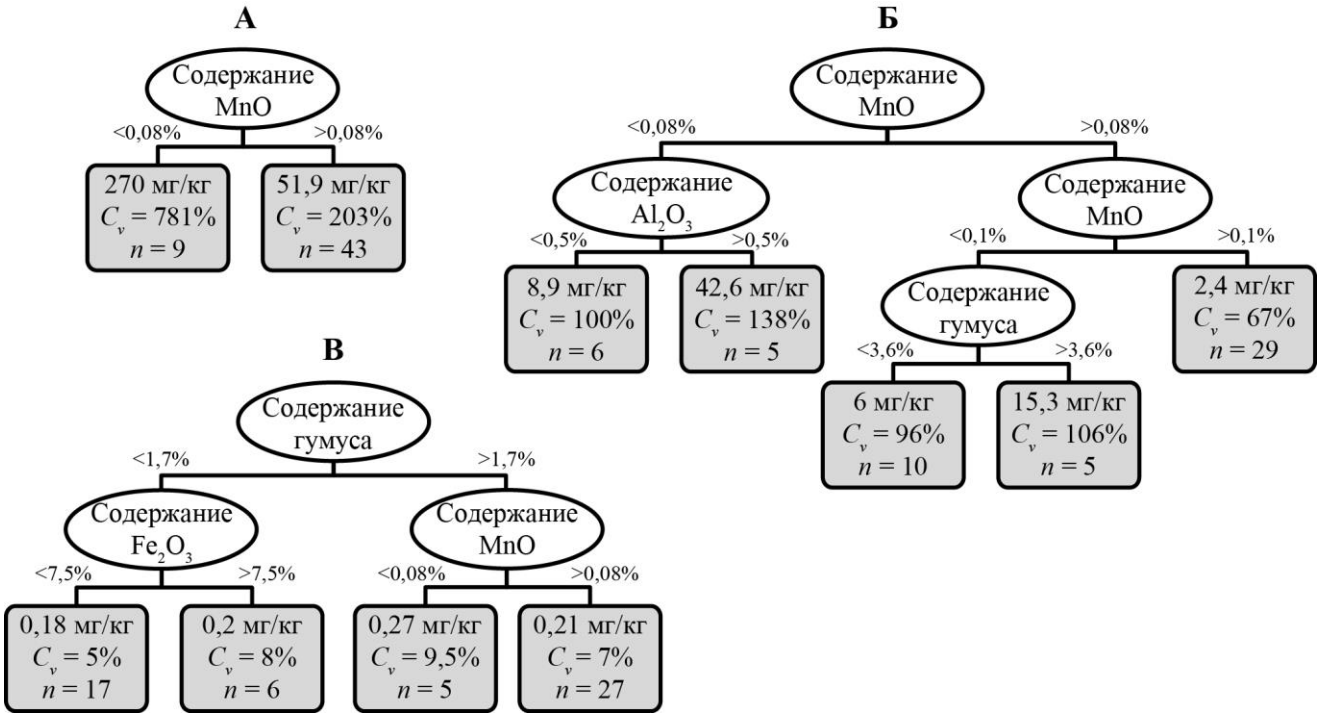


Рис. 35. Дифференциация Cu (А), Mo (Б) и Cd (В) в почвах катен Эрдэнэтав зависимости от природных и антропогенных факторов (в овалах). Для каждого конечного узла (в прямоугольниках) приводится средневзвешенная по профилю концентрация ТММ, коэффициент вариации C_v и число точек опробования n.

Радиальная дифференциация рудного элемента Cu зависит лишь от одного фактора – содержания оксида Mn. Поскольку элемент является халькофильным, катионогенным, в условиях семиаридных ландшафтов он имеет низкую миграционную способность. Внутрипрофильное распределение Cd имеет совершенно иной характер. В поверхностных горизонтах A1 он накапливается (0,22 мг/кг) на органо-минеральном ГХБ. В средней и нижней частях профиля наиболее значимым фактором является содержание Fe_2O_3, что свидетельствует о формировании хемосорбционного барьера.

Распределение второго рудного элемента Mo, как отмечалось ранее, обусловлено в основном влиянием почвообразующих пород. Однако в гумусово-аккумулятивных горизонтах, где содержания оксида Mn более 0,076%, поступающие в результате аэрогенного загрязнения ТММ осаждаются на органо-минеральном барьере, средние содержания Mo достигают 15,3 мг/кг, что более чем в 10 раз превышает кларк литосферы.

Таким образом, в горнопромышленных центрах радиальное перераспределение и накопление ТММ в почвенном профиле определяется изменением физико-химических свойств и влиянием педогеохимических барьеров, наиболее значимым из которых является хемосорбционный, на котором осаждаются V, Co, Ba, Sr, Bi, Mo, Sn, Zn, Cd в Закаменске и V, Cr, Co, Ni, Zn, Sr, Sn в Эрдэнэте. Высокий уровень техногенного воздействия в зоне влияния ДВМК привел к формированию комплексных ГХБ: на кислом-хемосорбционном накапливаются W, Pb, Sb; кислом-органо-минеральном – Cu, As; щелочном-хемосорбционном – Ni, Cr. В районе ГОК «Эрдэнэт» уровень техногенного воздействия значительно ниже, и данная особенность не выявлена. Повышенное содержание халькофильных рудных Cu, Mo и элементов-спутников As, Sb, Pb, Bi, W в нижней части почвенного профиля обусловлено влиянием литогеохимических особенностей почвообразующих пород Эрдэнэтского массива, а не формированием ГХБ.

Выводы

1. Из-за широкого распространения вулканических пород геохимическая специализация почв Закаменска и Эрдэнэта во всех родах ландшафтов имеет вид W-Mo-Cd-Bi-Sr (*КК*=1,5-9,2) и V-Co-Sr-As (1,5-3) соответственно. Наибольшие содержания элементов относительно глобальных кларков выявлены в автономных ландшафтах, что обусловлено присутствием в слаборазвитых (маломощных, горных) почвах большого количества мелких обломков почвообразующих пород, обогащенных вблизи Закаменска рудными (W, Mo) и элементами-спутниками (Cd, As, Sb), а в Эрдэнэте V, Co, Sr.

2. Дифференциация ТММ ярко выражена в почвах катен Закаменска, слабее – Эрдэнэта. В почвах подчиненных ландшафтов зоны влияния ДВМК и ГОК «Эрдэнэт» относительно фоновых увеличивается концентрация халькофильных элементов $W^{143}Mo^{87}Bi^{80}Sb^{32}Pb^{22}Cd^{19}Cu^{7}$

$Zn^{6,5}$ и $Mo^{13}Cu^{7}$ (верхние индексы – значения EF_l) соответственно, из-за активных процессов латеральной миграции из хвостохранилищ, расположенных в трансаккумулятивных позициях, и петрохимических особенностей почвообразующих пород Селенгинского комплекса. Полиэлементные ассоциации халькофильных элементов в обоих горнопромышленных центрах под техногенным воздействием изменили тип латеральной дифференциации с верхне- и внеаккумулятивного в фоновых условиях на нижне-аккумулятивный, а Cr-Ni – с верхне- на срединно-аккумулятивный. У V-Co-Sn в Закаменске и As-Sb-Bi в Эрдэнэте вне зависимости от уровня антропогенной деятельности тип катенарного перераспределения остался неизменным.

3. 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 эолового 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 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.

4. Анализ пространственного распределения латеральных геохимических барьеров в зоне влияния предприятий выявил наибольшее распространение в обоих горнопромышленных ландшафтах 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 пределах природно-рекреационной зоны и вдоль русла в виде узкой полоски локально формируются органо-минеральный и глеевый барьеры, соответственно.

5. Радиальная дифференциация валового содержания ТММ в горнопромышленных центрах 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 сульфидных W-Mo и Cu-Mo месторождений, формирования хвостохранилищ, являющихся неотъемлемой частью горнорудных районов и

технологии производственного цикла, в зоне влияния ДВМК, в отличие от Эрдэнэта, формируются комплексные радиальные педогеохимические барьеры.

ГЛАВА 5. МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ДРЕВЕСНЫХ РАСТЕНИЙ

5.1. Характеристика локального биогеохимического фона

Биогеохимические особенности локального фона выявлены путем сопоставления среднего содержания микроэлементов (**МЭ**) в изучаемых органах деревьев (табл. 19) с концентрацией рассеянных элементов в ежегодном приросте растительности суши (Добровольский, 2003) и анализа геохимических спектров, в которых элементы расположены в порядке убывания EF_g в хвое и коре лиственницы для ассимилирующих и многолетних органов соответственно (рис. 36). При построении спектров для Sb, W и Bi в качестве кларков брались значения, полученные B. Markert'ом (1992).

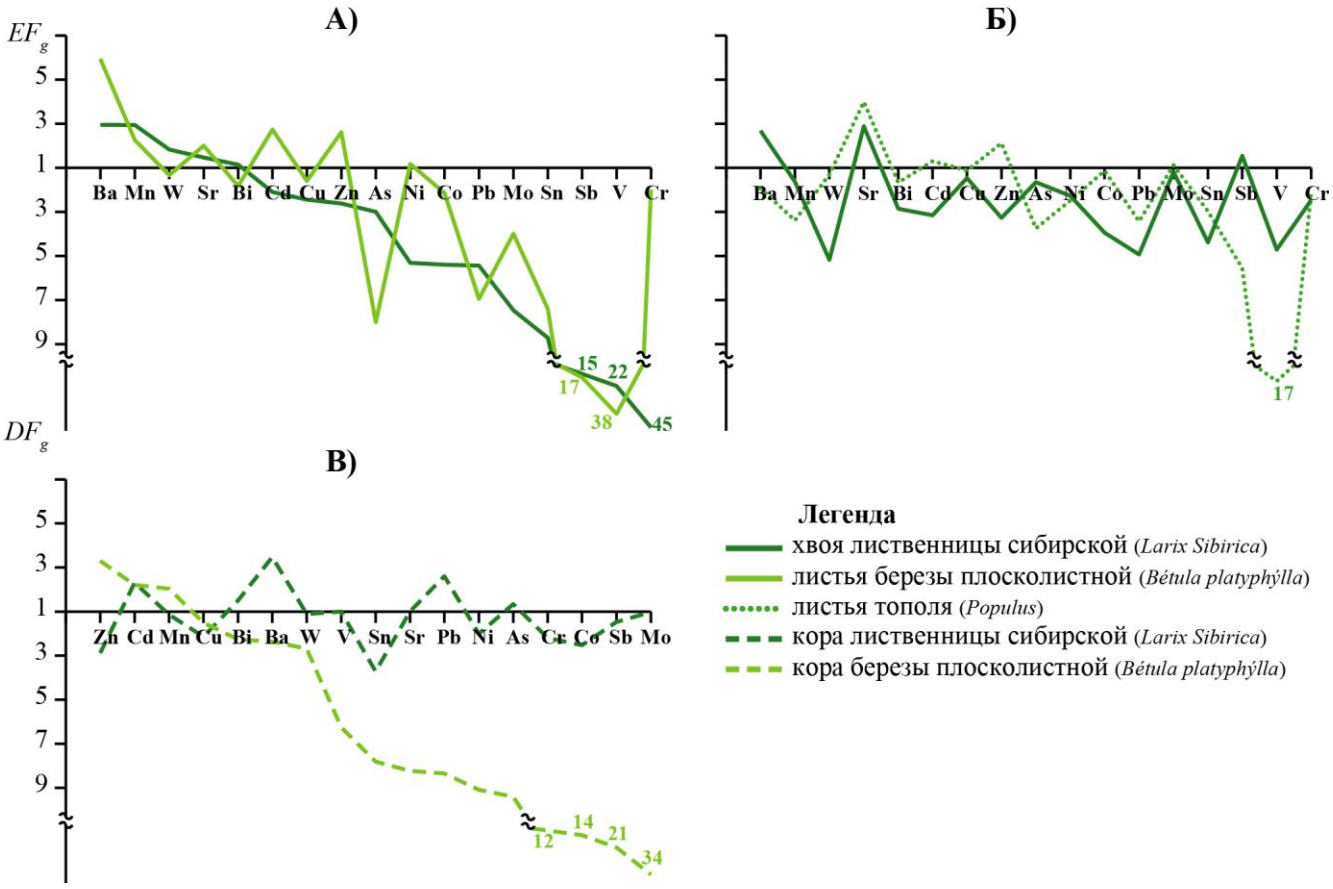


Рис. 36. Геохимические спектры МЭ в ассимилирующих и многолетних органах древесной растительности в фоновых условиях: вблизи Закаменска (А, В) и Эрдэнэта (Б).

Закаменск. Хвоя лиственницы и листья березы в фоновых условиях характеризуются повышенными концентрациями Ba (EF_g=2,9 и 5,9 соответственно) и Mn (2,9 и 2,3). Биологическая значимость и токсичность Ba изучены слабо (Иванов, 1994; Kabata-Pendias, 2011; Llugany, Poschenrieder, Barcelo, 2000; Suwa и др., 2008). Высокие содержания Ba (40-240 мг/кг сухого вещества), скорее всего, связаны с его повышенным содержанием в почвообразующих породах: плагиогранитах и гранодиоритах, распространенных на исследуемой территории. Весьма высокие содержания Mn в хвое и листьях древесных растений (340-870

Таблица 19. Среднее содержание МЭ (мкг/г) в ассимилирующих и многолетних органах древесных пород в фоновых условиях вблизи Закаменска и Эрдэнэта (в числителе – в сухом веществе; в знаменателе – в золе)

Древесная порода	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
Ассимилирующие органы вблизи Закаменск																	
Лиственница сибирская	0,07 2,13	0,04 0,04	603 18682	0,09 2,89	0,38 11,7	3,3 101	11,5 356	0,04 0,04	51 1602	0,07 2,08	0,02 0,52	0,03 0,89	0,01 0,20	66 2059	0,37 11,5	0,23 7,18	0,012 0,36
Береза плосколистная	0,04 0,68	0,9 15,4	463 7906	0,23 3,97	2,36 40,3	5,0 85,9	78,5 1342	0,02 0,26	70 1201	0,13 2,14	0,1 1,64	0,03 0,58	0,01 0,10	134 2286	0,15 2,56	0,18 3,08	0,005 0,09
Многолетние органы вблизи Закаменск																	
Лиственница сибирская	1,5 84,8	0,82 45,8	180 11411	0,2 11,4	1 57,5	3,7 229	10,4 626	0,16 9	35 2087	0,49 27,8	0,08 4,89	0,07 3,99	0,07 3,9	78 4830	0,18 13,6	3,26 184	0,015 1,13
Береза плосколистная	0,24 40	0,15 25,4	418 69583	0,04 5,9	0,22 36,7	5,3 888	99 16500	0,01 2,13	4 708	0,01 2,42	0,08 12,9	0,03 5,33	0,005 0,81	10 1588	0,07 12,4	0,15 25	0,004 0,74
Ассимилирующие органы вблизи Эрдэнэт																	
Лиственница сибирская	0,32 9,8	0,73 22,5	126 3882	0,13 3,90	0,88 27,1	5,5 168	9,2 282	0,07 2,24	101 3108	0,42 13	0,01 0,34	0,06 1,75	0,15 4,75	61 1862	0,04 1,19	0,25 7,79	0,004 0,11
Тополь	0,09 0,75	0,85 7,39	61 526	0,44 3,82	0,81 7	7,2 62,2	63,5 552	0,03 0,28	140 1213	0,56 4,87	0,05 0,40	0,08 0,73	0,02 0,11	12 102	0,15 1,33	0,37 3,17	0,006 0,033
Кларк (Добровольский, 2003)																	
Прирост растительности суши	1,5 30	1,8 35	205 4100	0,5 10	2 40	8 160	30 600	0,12 3	35 700	0,5 10	0,04 0,7	0,25 5	0,1* -	23 450	0,2* -	1,25 25	0,01* -

Примечание. * данные B. Markert'a (1992) для «стандартного дерева»

мг/кг сухого вещества) свидетельствуют об отсутствии техногенной нагрузки и согласуются с фоновыми уровнями содержания элементов в хвойных и лиственных древесных растениях, произрастающих на кислых почвах в Норвегии, Финляндии и России (Berthelsen и др., 1995; Brekken, Steinnes, 2004; Garmo, Froslie, Hoie, 1986; Gjengedal, Martinsen, Steinnes, 2015; Kalas, 2003; Lobersli, 1991; Reimann и др., 2001).

В листьях березы по сравнению с мировыми кларками Добровольского (2003) также накапливаются катионогенные элементы Cd (EF_g=2,7), Zn (2,6) и Sr (2,0), которые являются наиболее подвижными в кислых почвах Забайкальско-Монгольской лесостепи (Перельман, 1989). Содержания Sr в хвое и Ni в листьях близки к глобальным кларкам, а остальных МЭ – в несколько раз меньше. Наибольшим рассеянием отличается V с DF_g = 22 для хвои и 37 – для листьев, что обусловлено несколькими причинами. Данный элемент является анионогенным, поэтому рассматриваемым катионофильным растениям его накопление несвойственно. Исследуемые участки располагаются в зоне резко континентального климата, в результате чего оттаивание почвы, которое напрямую влияет на рост хвои (Lopez и др., 2007) и листьев, происходит позже, поэтому и вегетационный период, за который накапливаются МЭ, короче. Почвы, являющиеся основным источником МЭ в природных условиях, характеризуются низкими концентрациями рассматриваемых элементов – As, V, Sn, Pb (Timofeev, Kosheleva, 2016); При расчете мировых кларков преобладают данные по растениям гумидных ландшафтов, где интенсивность поглощения элементов выше (Касимов и др., 1989), а исследуемую территорию с коэффициентом увлажнения $K_{увл.}$=0,7-1,2, согласно классификации В.А. Ковды (1973), можно отнести к нормальной.

В коре лиственницы наиболее интенсивно накапливаются Ba (EF_g=3,5), Pb (2,6), Cd (2,3). Рассеяние характерно для Cu, Zn, Co, Cr, Ni и Sn (DF_g=2,1-3,7), а содержание оставшихся МЭ (Mn, Sr, Mo, V, As) близко к концентрациям рассеянных элементов в ежегодном приросте растительности суши. У коры березы картина несколько иная: накапливаются Zn (EF_g=3,3), Cd (2,2) и Mn (2,0); а все остальные исследуемые МЭ рассеиваются, наибольшей интенсивностью рассеяния отличаются Mo (DF_g=34), Co (14) и Cr (12).

Эрдэнэт. Ассимилирующие органы тополя и лиственницы в фоновых условиях характеризуются довольно низкой вариабельностью концентраций МЭ с накоплением Sr (EF_g=4,0), Zn (2,1) и Sr (2,9), Ba (2,7) соответственно. Повышенное относительно глобального кларка содержание Sr имеет природное происхождение, так как породы эрдэнэтского комплекса обогащены этим элементом. Его количество в распространенных на исследуемой территории гранодиоритах, гранодиорит-порфирах, адамеллит-порфирах составляет 800-1150 (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010), что в 3-4,5 раза превышает кларк литосферы (Касимов, Власов, 2015). Эти цифры соответствуют содержанию Sr в порфирах месторождений молибден-медно-

порфирового типа – 900-1100 мг/кг (Кривцов и др., 2001). Zn по схеме фазового химического анализа (Филиппова, 1975) и согласно данным (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010) присутствует на исследуемой территории преимущественно в сульфидной форме – в составе сфалерита (80%). Его концентрации достигают 70-600 мг/кг, что в 1-8 раз превышает кларки.

В ассимилирующих органах лиственницы сибирской на фоновых участках вблизи Эрдэнэта в меньшей степени, чем в районе Закаменска рассеиваются анионогенные элементы $V_{4,7}Sn_{4,4}As_{1,7}Mo_{1,2}$, что обусловлено более аридными условиями, где анионы находятся в более доступной для растений форме.

5.2. Изменения микроэлементного состава органов древесных растений

Приоритетные поллютанты в древесной растительности Закаменска и Эрдэнэта определены по геохимическим спектрам для разных функциональных зон, в которых элементы ранжированы по убыванию значений EF_l в наиболее загрязненной промышленной зоне Закаменска в хвое лиственницы сибирской (рис. 37 A-E).

Закаменск. Наибольшее преобразование МЭ состава ассимилирующих органов древесных растений выявлено в промзоне, где в хвое аккумулируются $Cr^{86,4}W^{34,4}V^{13,3}Pb^{10,7}Bi^{9,7}Sb^{8,6}Mo^{8,4}Ni^{5,6}Cd^{5,5}Sn^{3,4}As^{3,0}Sr^{2,2}$, а в листьях – $Mo^{12,3}Cr^{12,2}As^{8,1}V^{7,3}W^{5,7}Pb^{5,1}Bi^{4,7}Sb^{4,3}Cd^{2,5}Zn^{2,3}Ni^{2,3}Sn^{2,1}$. Травянистая растительность (пырей, подорожник, одуванчик, полынь и др.) на изучаемой территории, по данным (Смирнова, Плюснин, 2013; Тайсаев, Ходанович, Лбов, 1998), накапливает Mo, W, Pb, Cu и Zn, что связано с унаследованностью техногенными песками, складированными в хвостохранилищах, петрохимического состава разрабатываемых руд. Повышенное содержание Cr, V, Sb и Ni, особенно на участке между ТЭЦ и заводом «Литейщик», обусловлено поступлением этих элементов с выбросами при вторичной переработке изделий из цветного металла (Сает и др., 1990; Benin и др., 1999; Fernandez-Camacho и др., 2010; Goix и др., 2011; Mico и др., 2006) и использованием в качестве топлива мазута, минеральные компоненты которого включают эти загрязнители (Новоселов, 1983; Сает и др., 1990; Pacyna и др., 2007).

Селитебная зона, в состав которой входит городская многоэтажная и дачная застройки, является второй по уровню загрязнения. В результате неконтролируемого размещения отходов на западной границе этой функциональной зоны расположились аварийное и Джидинское хвостохранилища, материал которых обогащен W, Sb, Mo, Bi, Cd, Pb, Cu, Zn, As. Первое было ликвидировано в 2011 г. путем вывоза техногенных песков, однако часть ТМ осталась закрепленной в почвах на биогеохимическом барьере. На поверхности второго отсутствует растительный покров, оно имеет повышенную водопроницаемость и аэрируемость, в результате материал хвостохранилища подвергается интенсивной дефляции, водной эрозии, плоскостному смыву и химическому сернокислотному выветриванию. Это усиливает латеральную миграцию тяжелых

металлов и металлоидов в почвенном покрове (Тимофеев, Касимов, Кошелева, 2016) и накопление в хвое лиственницы $Cr^{20,4}W^{17,7}V^{17,2}Pb^{14,7}Bi^{11,2}Mo^{8,9}Sb^{8,7}Ni^{8,5}Cd^{4,2}As^{3,4}Co^{2,5}Sn^{2,5}$ и листьях березы $V^{11,5}W^{10,8}Mo^{7,2}Cr^{7,2}Bi^{7,2}Pb^{6,9}Sb^{6,0}As^{3,0}Ni^{2,3}$.

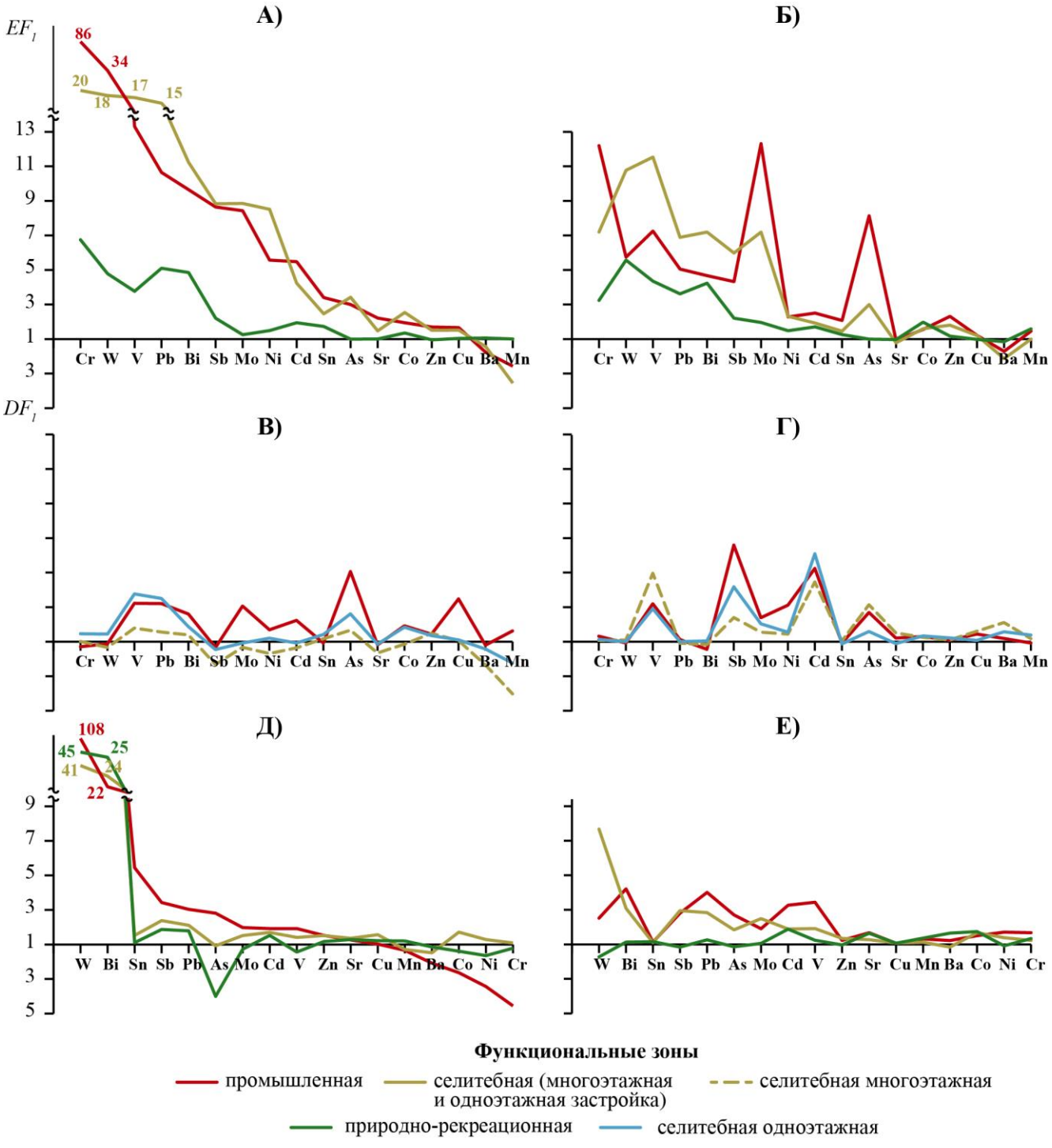


Рис. 37. Геохимические спектры МЭ в сухом веществе ассимилирующих и многолетних органов древесных растений различных функциональных зон горнопромышленных центров. Закаменск: А – хвоя лиственницы, Б – листья березы, Д – кора лиственницы, Е – кора березы; Эрдэнэт: В – хвоя лиственницы, Г – листья тополя.

Наименьшее техногенное воздействие испытывают ассимилирующие органы древесных растений в природно-рекреационной зоне, расположенной в долине р. Модонкуль. В этой зоне

в хвое накапливаются $Cr^{6,8}Pb^{5,1}Bi^{4,9}W^{4,8}V^{3,8}Sb^{2,2}Cd^{1,9}Sn^{1,7}Ni^{1,5}$, в листьях – $W^{5,6}V^{4,4}Bi^{4,2}Pb^{3,6}Cr^{3,2}Sb^{2,2}Co^{2,0}Mo^{2,0}Cd^{1,7}$, а значения локальных коэффициентов концентрации/рассеяния для всех остальных элементов близки к фоновым, т.е., как правило, не превышают 1,0-1,3.

Кора лиственницы и березы по сравнению с хвоей и листьями этих древесных растений накапливают другие элементы, перечень которых определяется уровнем антропогенной нагрузки. Во всех функциональных зонах в коре лиственницы установлено повышенное содержание рудного элемента W и его спутника Bi (Сает и др., 1990; Тимофеев, Касимов, Кошелева, 2016), а также типичных загрязнителей от автотранспорта – Pb и Cd (табл. 8). Но значения локальных коэффициентов концентрации EF_l не очень высокие – от 1,5 до 3,0, и лишь в промзоне они достигают 108 для W, 22 для Bi; 5,5 для Sn и 3,4 для Sb. Наибольшее рассеяние выявлено для Cr в промышленной и As природно-рекреационной зонах. Концентрации всех остальных элементов в коре близки к фоновым содержаниям с EF_l и $DF_l \leq 1{,}0\text{-}1{,}5$.

В коре березы, вне зависимости от уровня антропогенной нагрузки, накапливаются только Cd и Co (EF_l=1,5-3,3). Источником для первого служит автотранспорт, а для второго – дефляция материала хвостохранилищ, которые сформированы из руд Инкурского и Холтосонского месторождений с повышенными концентрациями Co и Cd (Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002). Максимальное бионакопление установлено для рудного элемента W (EF_l=7,7) в селитебной зоне, которая после закрытия ДВМК испытывает наибольшее техногенное воздействие в результате эрозии и разрушения мест складирования отходов. В коре березы, произрастающей в селитебной и промышленной зонах, как и в коре лиственницы, фиксируется превышение фоновых значений Bi, Sb, Pb, Mo, V, As (EF_l=1,9-4,3). Значения локальных коэффициентов концентрации/рассеяния в природно-рекреационной зоне не превышают 1,0-1,9.

Эрдэнэт. Преобразование МЭ состава ассимилирующих органов древесных растений здесь не так значительно, как в Закаменске. Для листьев тополя наибольшее воздействие проявилось в селитебной зоне с многоэтажной застройкой, где аккумулируются $V^{5,0}Cd^{4,5}As^{3,1}Sb^{2,4}Ba^{2,1}Cu^{1,6}Mo^{1,5}Sr^{1,5}$, а для хвои лиственницы – в промышленной с накоплением $As^{5,1}Cu^{3,5}V^{3,2}Pb^{3,2}Mo^{3,1}Bi^{2,6}Cd^{2,2}Co^{1,9}Ni^{1,7}Mn^{1,6}$. Эти органы получают значительные количества МЭ фолиарным путем, фиксируя их на кутикулах. За счет клеточной мембраны возможность дальнейшей транспортировки в другие органы растений снижается, формируя фитобарьер (Wyttenbach и др., 1997). В атмосфере селитебной зоны с многоэтажной застройкой основным источником МЭ является автотранспорт (Adachi, Tainosho, 2004; Charlesworth, Miguel De, Ordonez, 2011; Gietl и др., 2010; Iijima и др., 2007; Limbeck, Puls, 2010; Quiroz и др., 2013) за счет выхлопных газов, истирания шин и тормозных колодок, абразии дорожного покрытия и выдувания дорожной пыли и частиц почвы, накапливающихся вдоль бордюров, и др. (табл. 8). В промышленной зоне, помимо влияния автотранспорта, выявлено повышенное содержание As, Cu, Mo и Bi, источни-

ками которых являются: дробление добываемой породы до частиц размером 0,07 мм на первой ступени технологического процесса извлечения полезной руды; выбросы ТЭЦ и дефляция склада угля из разреза Баганур, который характеризуется повышенными относительно глобальных кларков для угля (Юдович, Кетрис, 2006) концентрациями As (EF_g=17,1), Sn (9,9), Zn (7,8), Pb (6,1), Sb (4,2), Cd (3,2) и Bi (2,3).

Второй по уровню загрязнения для ассимилирующих органов тополя и лиственницы является селитебная зона с юрточной застройкой, где накапливаются $Cd^{6,1}Sb^{4,2}V^{2,9}Mo^{2,0}As^{1,6}Ba^{1,6}Ni^{1,6}$ и $V^{3,8}Pb^{3,5}As^{2,6}Bi^{1,9}Co^{1,8}$, соответственно. Основным источником являются выбросы печей, которые топятся бурым углем из разрезов Баганур и Шарынгол. Близкие уровни содержания МЭ в листьях тополя обнаружены в промышленной зоне – $Sb^{6,6}Cd^{5,2}V^{3,2}Ni^{3,1}As^{2,7}Mo^{2,4}$. Наименьшее техногенное воздействие испытывает хвоя лиственницы сибирской в селитебной зоне с многоэтажной застройкой, где слабо накапливаются $V^{1,8}As^{1,7}Pb^{1,6}$. Наибольшее рассеяние в этих условиях выявлено у Mn, Ba, Sb, Ni, Sr (DF_l 4,0-1,7).

Таким образом, ассимилирующие органы хвойных и лиственных древесных пород обладают похожими перечнями приоритетных загрязнителей, что свидетельствует о слабой видовой избирательности поглощения, и более интенсивным накоплением элементов 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. Все это обусловливает аномально высокие содержания МЭ в хвое лиственницы и листьях березы и тополя. Хвоя лиственницы отличается более высокими значениями локальных коэффициентов концентрации EF_l, чем листья березы, что вызвано физиологическими особенностями ассимилирующих органов – на хвое имеется восковой слой кутикулы, который прочно связывает МЭ (Aznar и др., 2009; Gandois, Probst, 2012; Lin и др., 1995; Liu и др., 2006; Muller, Riederer, 2005; Raitio, Tuovinen, Anttila, 1995; Rautio, Huttunen, 2003; Trimbacher, Weiss, 2004), и методикой пробоподготовки – осаждающиеся на поверхности листьев березы элементы удалялись путем их промывания дистиллированной водой.

5.3. Связь микроэлементного состава древесных растений и почв

Деревья способны избирательно поглощать из среды и накапливать в золе некоторые элементы. Наиболее наглядно биогеохимическую специализацию видов отражают коэффициенты бионакопления $КБН_1$ и $КБН_2$. Для расчета $КБН_1$ в ходе полевых работ производилось обследование почвенных профилей с отбором образцов и дальнейшем определением валового содержания МЭ с помощью метода ICP-MS. Для каждого профиля рассчитано средневзешенное содержание элементов, так как деревья поглощают минеральные и органические вещества из

всей почвенной толщи и лишь потом произведено усреднение средневзвешенных значений для каждой функциональной зоны. В качестве кларков при расчете $КБН_2$ использовались оценки различных авторов, рекомендованные в работе Н.С. Касимова и Д.В. Власова (2015). Такие расчеты позволяют построить ряды биологического накопления для изучаемых элементов.

Закаменск. В хвое лиственницы во всех функциональных зонах (рис. 38) происходит энергичное и сильное накопление преимущественно катионогенных элементов (Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Bi), что характерно для районов Забайкалья, где распространены кислые почвы (Перельман, 1989). В эту группу вошли также анионогенный рудный элемент W. Их повышенное содержание как в почвах, так и в растениях связано с природной литогеохимической аномалией. В группу слабого захвата в фоновой и природно-рекреационной зонах входят типичные для данных ландшафтно-геохимических условий анионы V и Cr. Наибольшее количество элементов (11) накапливается в хвое лиственницы сибирской в селитебной зоне, что связано с активным поступлением элементов в почвы в результате латеральной миграции МЭ в процессе разрушения хвостохранилищ.

Значения коэффициентов биологического накопления $КБН_2$, рассчитанных относительно мировых кларков литосферы (Касимов, Власов, 2015), оказались близкими к значениям $КБН_1$ (рис. 39). Они позволяют установить влияние не только техногенного изменения в распределении МЭ, но и природной литогеохимической аномалии, в пределах которой расположен изучаемый горнопромышленный центр. Для всех зон, за исключением фоновых территорий, характерно энергичное накопление рудных W и Mo и элементов-спутников Cd, Bi, Sr в хвое лиственницы сибирской с максимальными значениями в промышленной зоне – 145, 12,5, 26, 11,7 и 10,6 и минимальными в фоновых условиях – 5,6, 1,9, 5,8, 1,6 и 5,9 соответственно.

Биогеохимическая специализация коры аналогична хвое (рис. 38), в ней накапливаются катионогенные (Cd, Ni, Cu, Zn, Sr, Sn, Ba, Pb, Bi), рудные элементы (W, Mo). Однако при анализе $КБН_1$, рассчитываемый относительно содержания в почвах той же функциональной зоны, где расположена древесная растительность, в промышленной зоне не выявлено энергичного накопления МЭ, так как почвы этой функциональной зоны характеризуется очень высокими валовыми концентрациями, что приводит к снижению показание $КБН_1$. Так, например, содержание Mo, W и Bi в поверхностном горизонте достигает значений 127, 199 и 21 мг/кг, что в 30-120 раз выше кларков литосферы. При столь высоких концентрациях в почвах резкого накопления в растениях не происходит, что указывает на барьерность поглощения ТММ у этих видов растений при критическом уровне техногенного «пресса». Эта особенность хорошо проявляется при анализе содержания МЭ в коре лиственницы сибирской по отношению к кларкам – для W в промышленной зоне значение $КБН_2$ достигает 217.

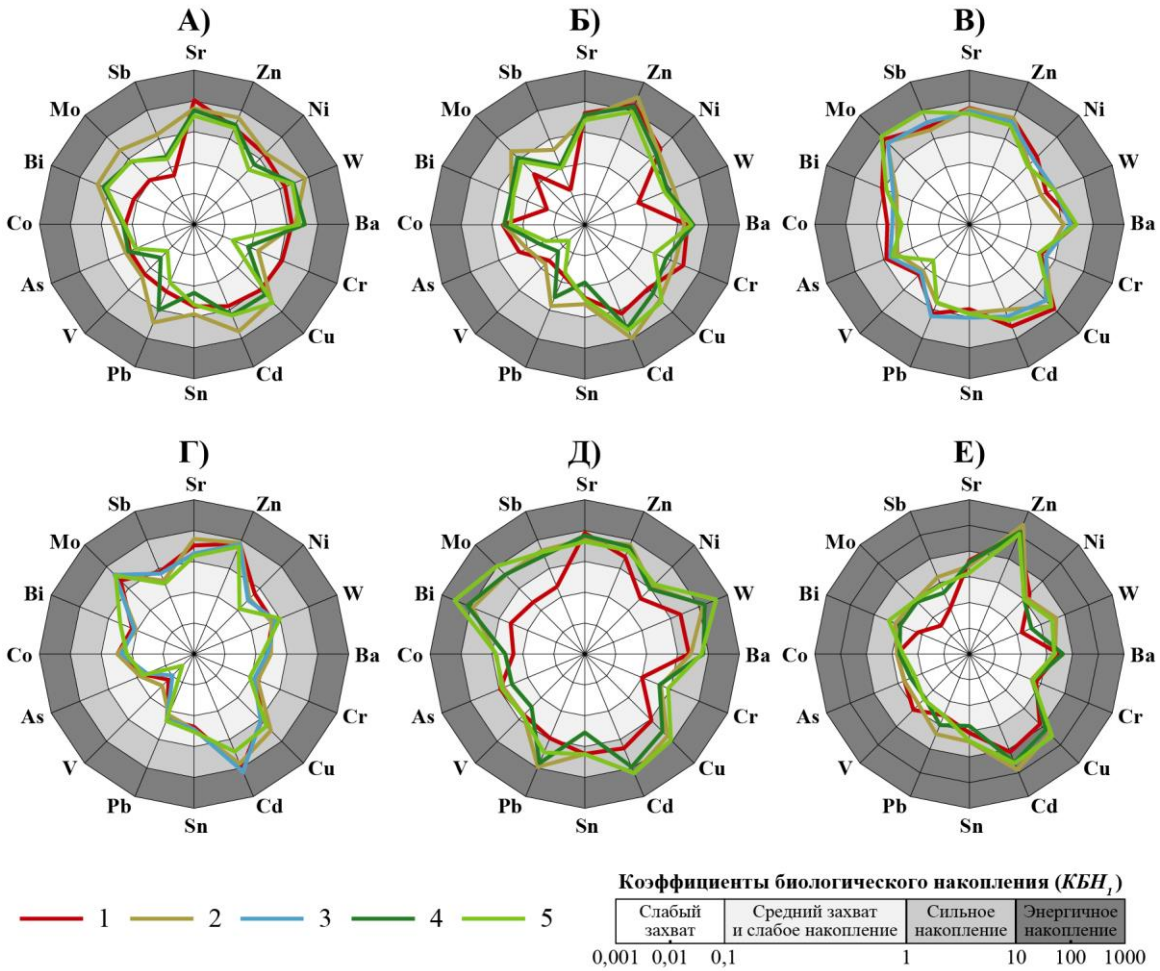


Рис. 38. Ряды распределения *КБН*$_1$ для органов древесных растений горнопромышленных центров. Закаменск: хвоя (А) и кора (Д) лиственницы сибирской (*Larix Sibirica*); листья (Б) и кора (Е) березы плосколистной (*Bétula platyphýlla*). Эрдэнэт: хвоя (В) лиственницы сибирской (*Larix Sibirica*); листья (Г) тополя (*Populus*). Функциональные зоны: 1 – промышленная; 2 – селитебная с многоэтажной застройкой; 3 – селитебная с одноэтажной (юрточной) застройкой; 4 – природно-рекреационная; 5 – фоновая.

Ассимилирующие и многолетние органы березы плосколистной имеют как общие с лиственницей сибирской, так и отличные от нее особенности поглощения МЭ из почв. К первым относится аккумуляция катионогенных (Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Bi), рудных (W, Mo). Для промышленной зоны характерно вхождение рудных элементов в группы среднего и слабого захвата. Анализ коэффициентов биологического накопления также позволяет выявить видовые особенности рассматриваемых древесных пород, произрастающих в одном биогеоценозе (урбоэкосистеме). Так, в листьях и коре березы плосколистной, в отличие от лиственницы сибирской, интенсивно аккумулируются типичные для городских условий загрязнители – Cd и Zn. Максимальные значения *КБН*$_2$ в многолетних органах установлены для Cd в промышленной зоне (467) и для Zn – в селитебной (295). Полученные результаты подтверждают ранее полученные данные о видовой специализации растений при различных уровнях антропогенной нагрузки (Есенжолова, Панин, 2012; Опекунова, 2013).

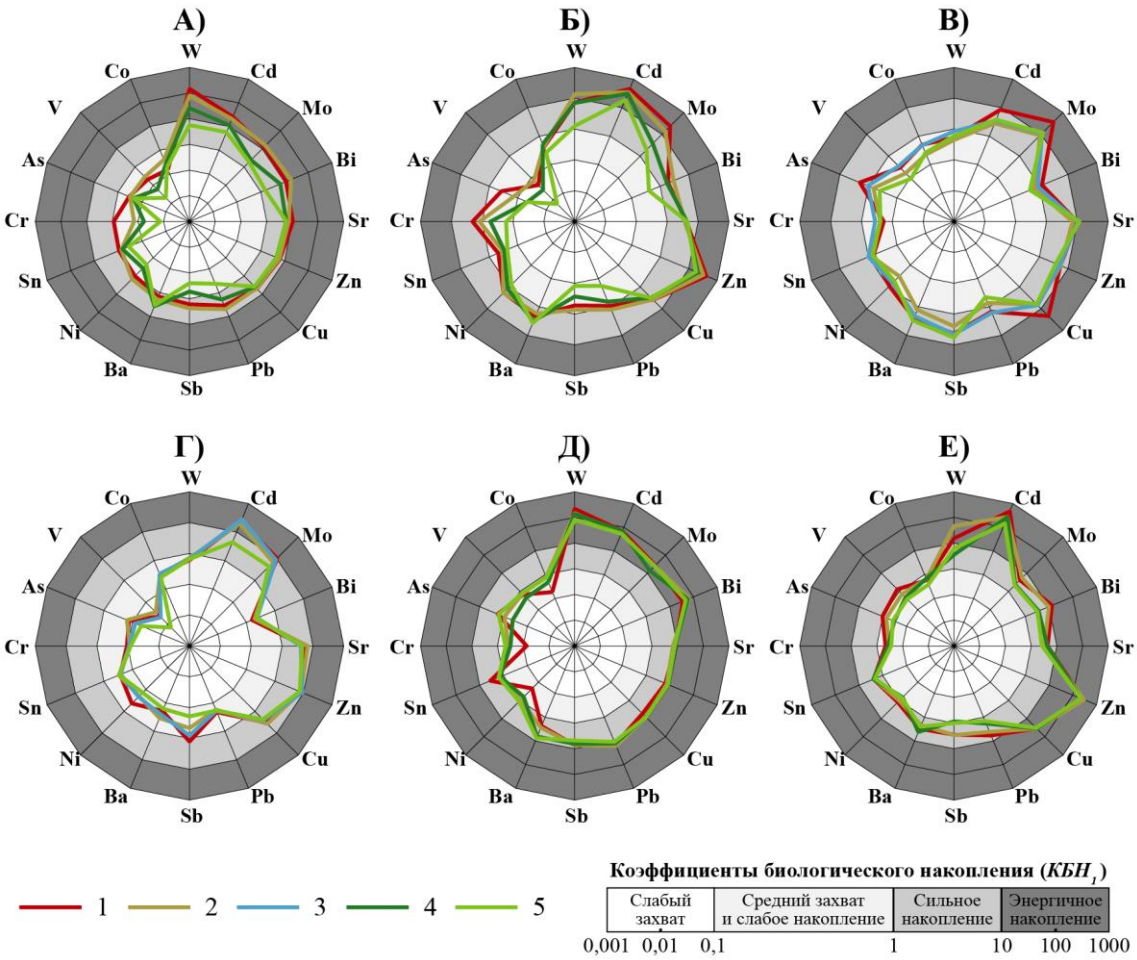


Рис. 39. Ряды распределения $КБН_2$ для органов древесных растений горнопромышленных центров. Закаменск: хвоя (А) и кора (Д) лиственницы сибирской (*Larix Sibirica*); листья (Б) и кора (Е) березы плосколистной (*Bétula platyphýlla*). Эрдэнэт: хвоя (В) лиственницы сибирской (*Larix Sibirica*); листья (Г) тополя (*Populus*). Функциональные зоны: 1 – промышленная; 2 – селитебная с многоэтажной застройкой; 3 – селитебная с одноэтажной (юрточной) застройкой; 4 – природно-рекреационная; 5 – фоновая.

Эрдэнэт. При оценке связи микроэлеметного состава с содержанием ТММ в почвах зольность хвои лиственницы сибирской в Эрдэнэте принята равной зольности хвои в Закаменске. Для листьев тополя принято осредненное по литературными источникам значение зольности 11,5% (Есенжолова, Панин, 2012; Карташева, 1984), которое согласуется с разработанной Эбермайером шкалой (Ремезов, Погребняк, 1965), согласно которой зольность листьев тем выше, чем больше влаги они испаряют.

Ассимилирующие органы различных пород древесной растительности в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» имеют ряд общих характеристик (рис. 38). Во всех функциональных зонах происходит энергичное и сильное накопление рудных Cu и Mo, элемента-спутника Sr и типичных для городских условий загрязнителей – Zn и Cd. Наиболее сильно трансформирован микроэлементный состав хвои лиственницы сибирской, у которой коэффициенты бионакопления $КБН_1$ в промышленной зоне составляют для Cu и Mo 7,6 и, 7,9, для Sr 5,6, для Zn и Cd 5,0 и 3,8 соответственно.

Для хвои лиственницы также свойственна аккумуляция Sb и Ba. Первый является индикатором воздействия автотранспорта (Власов, 2015), второй отражает петрохимические особенности горных пород исследуемой территории. Группа слабого накопления и слабого захвата включает V, Cr, Co, As, Sn, W, что свидетельствует о довольно низком уровне техногенного воздействия на растительность.

Листья тополя, в отличие от ассимилирующих органов хвойной растительности, характеризуются энергичным накоплением Cd с максимумом в промышленной зоне – $КБН_1$ = 10,4; $КБН_2$ = 23,3. В группу слабого захвата во всех функциональных зонах входят V, Cr и As – элементы группы железа, которые имеют близкое распределение в почвообразующих породах изучаемой территории, обусловленное повышенным содержанием V–As–Cr в амфиболовых габбро и диоритах, преобладающим на первом этапе формирования Селенгинского комплекса (Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010).

5.4. Аккумулятивный потенциал древесных видов

По исследованиям А.Д. Айвазян (1974) и М.Д. Уфимцевой и Н.В. Терехиной (2005) региональные биогеохимические характеристики определяются, в первую очередь, кислотно-щелочными условиями. В связи с указанным фактором выделяют две основные группы растений по особенностям микроэлементного состава (Айвазян, 1974): гумидокатные и аридокатные. Первой свойственно накопление катионогенных элементов (Mn, Zn, Cu, Pb, Sr, Ba и др.), обладающих в гумидных ландшафтах с кислой реакцией среды наибольшей миграционной способностью. Состав второй группы сформировался в более разнообразных природно-климатических и ландшафтно-геохимических условиях семиаридных и аридных областей, он определяется аккумуляцией анионогенных элементов (Mo, Cr, Ti, V и др.), практически не накапливающихся в гумидных ландшафтах. Исходя из аккумулирующих свойств растений их называют катионофильными и анионофильными соответственно.

Общий аккумулятивный потенциал древесных растений в различных функциональных зонах оценивался с помощью совместного анализа коэффициентов биогеохимической активности для анионогенных ($А_{БХА}$) и катионогенных ($К_{БХА}$) элементов. Результаты показывают, что ассимилирующие органы лиственницы, березы и тополя в рассматриваемых горнопромышленных центрах представляют собой гомогенную биогеохимическую систему, функциональная структура которой характеризуется существенным накоплением катионогенных элементов (рис. 40). Обратная ситуация выявлена в хвое лиственницы на фоновых территориях вблизи Эрдэнэта, где значения $А_{БХА}$=3,1 превышают $К_{БХА}$=2,2, что обусловлено литогеохимической аномалией рудного Mo, который в условиях нейтральной и слабощелочной реакций среды присутствует в почвах в анионной форме. Наиболее близкие значения коэффициентов $А_{БХА}$ и $К_{БХА}$

установлены для коры лиственницы, где катионогенные и анионогенные элементы аккумулируются практически одинаково, что связано с довольно высоким содержанием основных рудных элементов W и Mo, присутствующих в почвах в анионной форме.

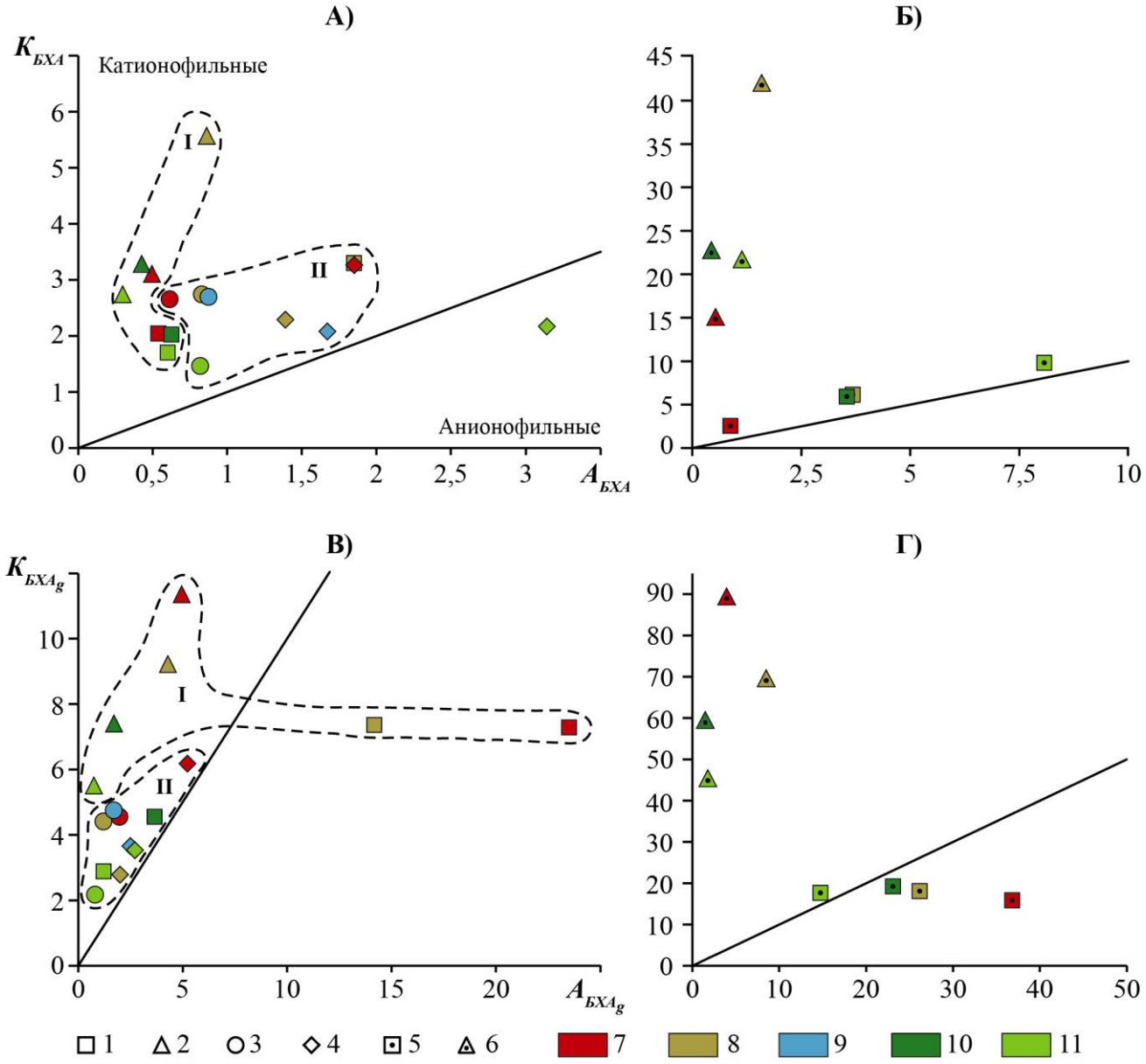


Рис. 40. Поля соотношений анионо- и катионогенных химических элементов в ассимилирующих (А, В) и многолетних (Б, Г) органах древесной растительности. Закаменск (I): хвоя (1) и кора (5) лиственницы сибирской (*Larix Sibirica Ledeb.*); листья (2) и кора (6) березы плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukaczev*). Эрдэнэт (II): листья (3) тополя (*Populus*); хвоя (4) лиственницы сибирской (*Larix Sibirica Ledeb.*). Функциональные зоны: 7 – промышленная; 8 – селитебная с многоэтажной застройкой; 9 – селитебная с одноэтажной (юрточной) застройкой; 10 – природно-рекреационная; 11 – фоновые участки.

Установлено, что при увеличении уровня антропогенного воздействия происходит изменение значения коэффициентов биогеохимической активности анионногенных и катионогенных элементов. Минимальные показания $A_{БХА}$ (0,5-0,9) зафиксированы в промышленной зоне, а не в фоновых условиях. Наибольшие (1,6-3,7) – в селитебной. При его подсчете используются значения $КБН_1$, рассчитываемые относительно концентрации ТММ в почвах этой же функцио-

нальной зоны, а содержания в промышленной зоне, в отличие от селитебной, в десятки и сотни раз выше глобальных кларков (Касимов, Власов, 2015).

Специфика горнопромышленных ландшафтов – их приуроченность к металлогенической аномалии. Если показатель биогеохимической активности, рассчитанный с помощью $КБН_1$, характеризует биогеохимическую трансформацию древесных растений под воздействием техногенных источников, то расчет с помощью $КБН_2$ позволит определить их активность с учетом природной геохимической аномалии. В качестве эталона в этом случае используются глобальные кларки (Касимов, Власов, 2015), а не содержания в почвах различных функциональных зон со значительно более высокими концентрациями ТММ. Такие показатели предлагается называть глобальные коэффициенты биогеохимической активности ($A_{\text{БХА}_g}$ и $K_{\text{БХА}_g}$).

Наименьшие значения $A_{\text{БХА}_g}$ (0,5-2,8) для ассимилирующих органов установлены в фоновых условиях. При увеличении уровня антропогенного воздействия содержание анионов в древесных растениях постепенно увеличивается, достигая в селитебной зоне значений 1,2-14,2, а в промышленной – максимальных от 1,9 до23,5. Это объясняется высокими концентрациями основных рудных элементов Mo и W, присутствующие в почвах в анионной форме. Сравнительная биогеохимическая активность древесных растений, являясь интегральным показателем, отражает их аккумулятивный потенциал и обнаруживает различия между их эколого-морфологическими группами. Лиственница сибирская, как в хвое, так и коре, в условиях промышленной и селитебной зон, где уровень антропогенного воздействия максимален, характеризуется превышением суммы анионов, над суммой катионов, таким образом определяя это растение как анионофитное.

Таким образом, в горнопромышленных центрах выявлены значительные изменения в биопоглощении МЭ, вызванные техногенным воздействием. Ассимилирующие и многолетние органы хвойных и лиственных пород во всех функциональных зонах, за исключением фоновых ландшафтов, являются катионофильными и активно накапливают элементы среднего и слабого захвата (Перельман, Касимов, 1999) – Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, а также специфичные для рудных проявлений анионы – W и Mo. Для всех этих МЭ величина коэффициентов биологического накопления больше 1, что свидетельствует не только о накоплении данных загрязнителей, но и о формировании фитобарьера (Алексеенко, 2006). Видовые различия в накоплении МЭ 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. Поскольку рассматриваемые лиственные виды накапливают достаточно высокие концентрации элементов, их наиболее целесообразно использовать для очищения атмосферного воздуха, загрязненного данными элементами.

Выводы

1. По сравнению с общемировыми кларками в древесных породах фоновых условий вблизи горнопромышленных центров повышены концентрации не рудных, а элементов-спутников, характерных для Джидинского и Эрдэнэтского комплексов почвообразующих пород: в Закаменске – Ba, Mn, Cd, Zn, Sr, Pb; в Эрдэнэте – Sr, Zn, Ba. В последнем проявляются особенности семиаридных условий – анионогенные элементы V, Cr, As, Sb, Sn в меньшей степени рассеиваются (DF_g=1,5-17), чем в органах древесных растений вблизи зоны влияния ДВМК. В многолетних органах лиственницы сибирской и березы плосколистной в районе Закаменска незначительно накапливаются Ba, Pb, Cd и Zn, Cd, Mn, соответственно, рассеяние характерно для Cu, Zn, Co, Cr, Sn и Mo, Co, Cr, а содержание оставшихся МЭ близко к концентрациям рассеянных элементов в ежегодном приросте растительности суши.

2. На территории Закаменска органы лиственницы сибирской и березы плосколистной обогащены Cr, W (EF_l=86-34), V, Pb, Bi, Sb, Mo (EF_l=13-8), Ni, Cd, Sn, As, Sr (EF_l=6-2) по сравнению с местным фоном, что вызвано неконтролируемым размещением хвостов предприятия, выбросам ТЭЦ и завода по переплавке металлов. В отличие от него, в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» воздействие минимально и проявляется в превышении концентраций ТММ относительно фона лишь 1,5-6,5 раз. В Закаменске степень трансформации микроэлементного состава лиственных и хвойных пород снижается в одном ряду: промышленная зона > селитебная > природно-рекреационная. В Эрдэнэте – в различных: для лиственных – селитебная с многоэтажной застройкой > промышленная > селитебная с одноэтажной, а для хвойных – промышленная > селитебная с многоэтажной > селитебная с одноэтажной.

3. В Закаменске и Эрдэнэте в группу сильного и очень сильного захвата микроэлементов из почвенной толщи входят основные катионы (Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb, Bi), которые в условиях кислой реакции среды наиболее миграционно способны, и анионы представленные рудными элементами W и Mo. В группу слабого захвата в фоновой и природно-рекреационной зонах входят типичные для данных ландшафтно-геохимических условий анионы V и Cr.

4. Несмотря на влияние горнодобывающей промышленности, древесные растения в зоне воздействия ДВМК и ГОК «Эрдэнэт» сохраняют свою биогеохимическую специализацию: катионогенная активность доминирует над анионогенной. Формирование горнопромышленных центров в условиях металлогенических аномалий выявляется с помощью анализа $КБН_2$ и приводит к возрастанию активности анионогенных элементов Mo, W, Sb, As. Территориально, по видам и по органам величины $К_{БХА}$ и $А_{БХА}$ значительно варьируют.

ГЛАВА 6. ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА И ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРОВ

6.1. Техногенная геохимическая трансформация почв горнопромышленных центров

Закаменск. Степень геохимической трансформации почвенного покрова в зоне воздействия ДВМК определялась на основе суммарного показателя загрязнения Z_c. Выявлено несколько аномальных зон (рис. 41 А). Наиболее контрастная приурочена к рекультивированному в 2011 г. аварийному хвостохранилищу, на котором отсутствует растительный покров, а верхний слой представляет собой смесь погребенного ранее гумусового горизонта и отходов производства. Значения Z_c достигают здесь 485–721, превышая чрезвычайно опасный уровень в 3–5 раз.

Вторая аномалия образовалась в границах основного Барун-Нарынского и нового Зун-Нарынского хвостохранилищ (рис. 41 А) с максимумами Z_c 316 и 292, соответственно. Третья захватывает Модонкульское техногенное месторождение на левом берегу реки, обязанное своим происхождением сбросам при нештатных ситуациях на предприятии и процессам размыва, руслового транспорта и последующего отложения материала хвостохранилищ на механическом барьере, где направление течения меняется с меридионального на субширотное. Максимальные значения показателя Z_c достигают здесь 200. Четвертая аномальная зона сформировалась в пределах Джидинского хвостохранилища и аварийного канала сброса отходов ДВМК (265), где значения суммарного показателя загрязнения (max Z_c = 258) более чем в 2 раза превышают чрезвычайно опасный уровень. Образование пятой аномалии на юго-востоке связано с делювиальным смывом материала отвалов вскрышных пород, а также с возобновившейся разработкой Au-W россыпи.

Наибольшее техногенное воздействие испытывают почвы: в местах складирования отходов ДВМК; многоэтажной жилой застройки с наибольшей плотностью населения, детских учреждений и иной инфраструктуры; пойм и террас рек Модонкуль, Барун-Нарын, Зун-Нарын, Инкур, а также участков складирования вскрышных пород. Максимальный уровень загрязнения почв (Z_c > 128) зафиксирован на 22 % территории горнопромышленного центра (рис. 42 А). Столь обширная площадь чрезвычайно загрязненных почв образовалась в результате широкого использования отходов производства, содержащих токсичные элементы I–III класса опасности – при подготовке цементной смеси для строительства домов и других зданий, создания детских песочниц, отсыпки дорог, засыпки ям и т.д. При таком суммарном содержании ТММ увеличиваются показатели заболеваемости населения болезнями органов дыхания и костно-мышечной системы (МУ 2.1.7.730-99, 1999).

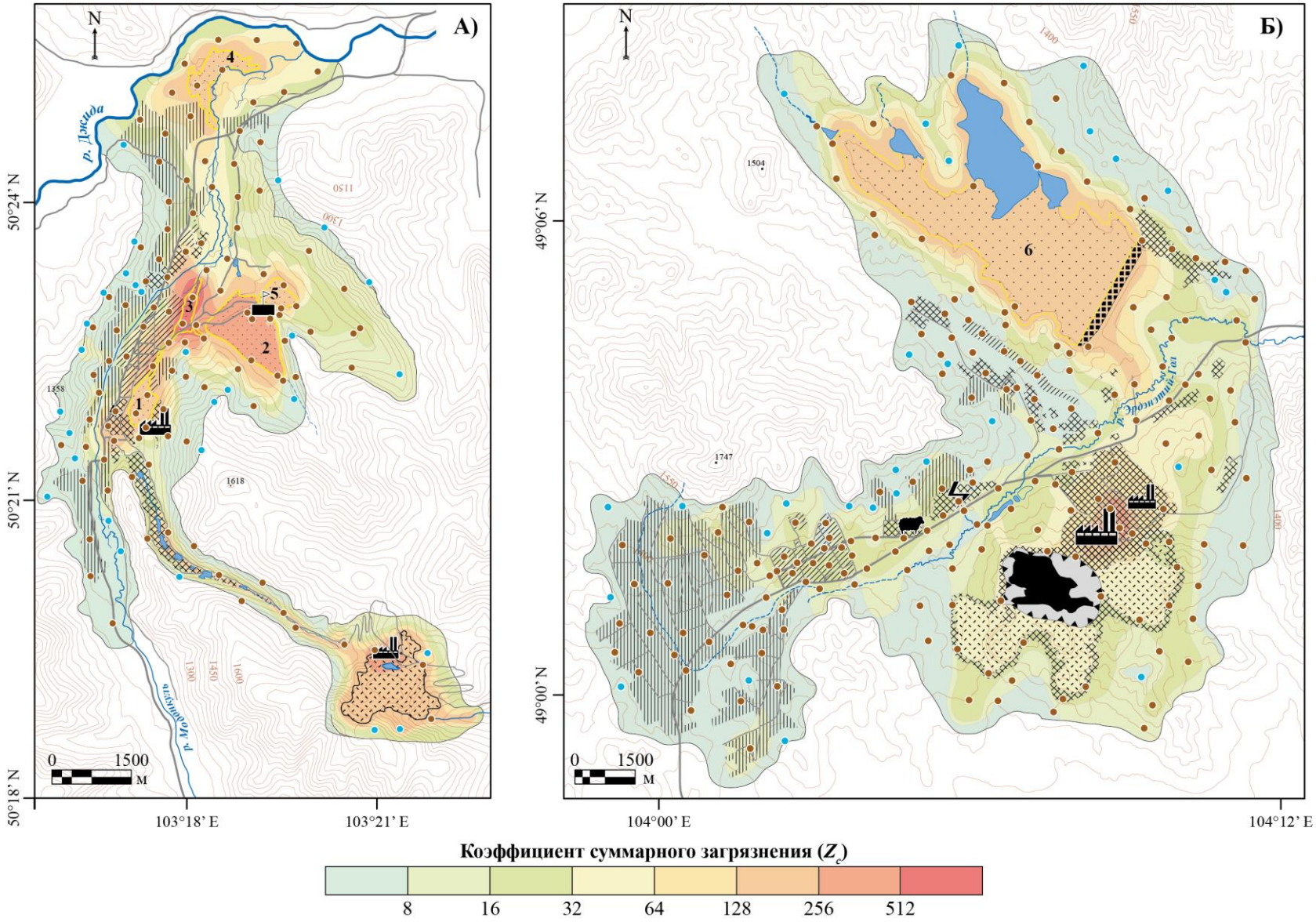


Рис. 41. Распределение суммарного показателя загрязнения (Z_c) в поверхностном слое почв Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б). Хвостохранилища: 1 – Джидинское; 2 – Барун-Нарынское; 3 – аварийное; 4 – Модонкульское; 5 – Зун- Нарынское; 6 – Эрдэнэтское

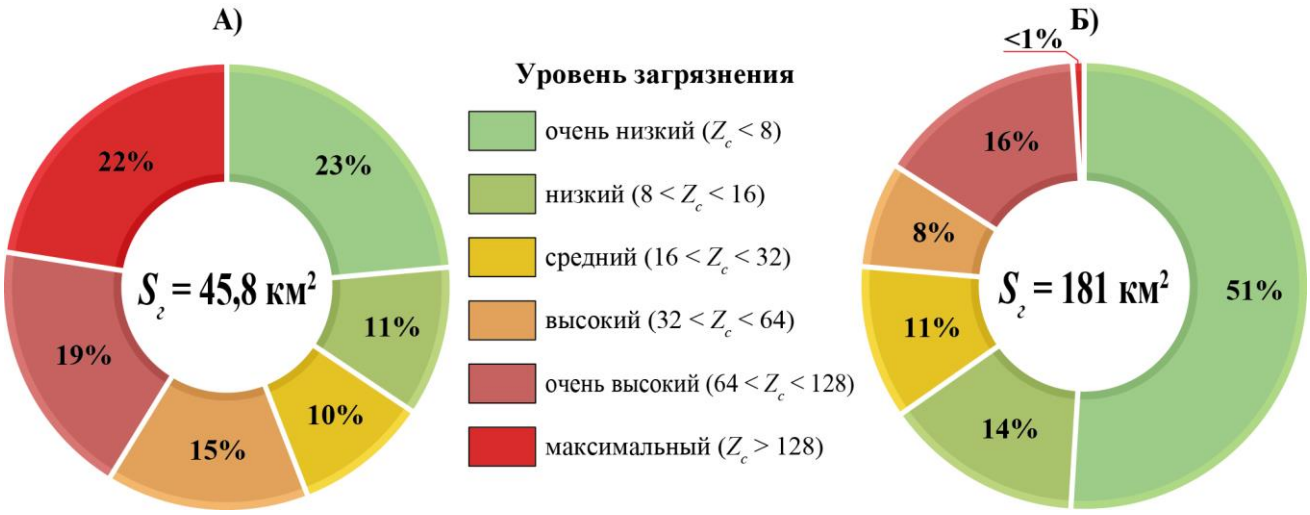


Рис. 42. Распределение площадей почв Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б) по градациям Z_c . $S_г$ – общая площадь горнопромышленного центра

Слабая техногенная геохимическая трансформация (Z_c < 16) характерна для почв дачной застройки и природно-рекреационной зоны на окраинах города, на берегах р. Модонкуль в ее верховьях и на левом берегу в ее среднем и нижнем течении, в верховьях пересохших рек Зун-Нарын и Барун-Нарын. Общая площадь этих участков составляет 34%.

Средняя степень геохимической нарушенности почв (16 < Z_c < 32) выявлена вокруг мест складирования отходов в нижней части долины руч. Инкур и рекультивированного аварийного хвостохранилища, на городской свалке к востоку от города, на 3,5-км участке в долине р. Модонкуль между Барун-Нарынским хвостохранилищем и Модонкульским техногенным месторождением. Площадь этих участков составляет 10 %. Умеренный и высокий уровень антропогенной нагрузки (32 < Z_c < 128) установлен вокруг основных зон аккумуляции – хвостохранилищ, а также в долине руч. Инкур. Их общая площадь составляет 34 % (рис. 42 А).

Эрдэнэт. В Эрдэнэте выявлены две контрастные полиэлементные геохимические аномалии. Первая находится на территории складирования отходов – в хвостохранилище (рис. 41 Б), на поверхности которого, как и в зоне влияния ДВМК, отсутствует растительный покров, однако его северная часть покрыта водой, а с дамбы постоянно поступает пульпа – смесь воды, кислот, органических загрязнителей с переработанной горной породой. Таким образом, большая часть хвостохранилища либо затоплена водой, либо перенасыщена ею, что препятствует развитию эрозии и дефляции. Значения суммарного показателя загрязнения здесь достигают 109-118, не превышая чрезвычайно опасный уровень (Z_c = 128).

Вторая аномальная зона зафиксирована в промышленной зоне, на территории ГОК «Эрдэнэт» и «Эрдмин» (рис. 41 Б), где максимальные значения Z_c в локальной аномалии достигают 1559, что более чем в 10 раз превышает чрезвычайно опасный уровень. На этих предприятиях занято большое количество местного населения, которое постоянно подвергается вредному воздействию высоких концентраций ТММ, что может вызвать респираторные заболевания.

Анализ пространственного распределения Z_c показал (рис. 41 Б, рис. 42 Б), что на половине горнопромышленного центра (51 % от исследуемой площади) выявлена очень слабая техногенная трансформация с низким уровнем загрязнения поверхностного слоя почв ($Z_c < 8$), а 14 % – слабая ($8 < Z_c < 16$). Восточная же часть, относящаяся к промышленной зоне, характеризуется очень высоким уровнем загрязнения почвенного покрова. Наибольшее техногенное воздействие ($Z_c > 128$) зафиксировано на <1 % исследуемой территории, где располагаются ГОК и предприятие по производству катодной меди – «Эрдмин». Умеренный и высокий уровень антропогенной нагрузки ($32 < Z_c < 128$) установлен в пределах основных зон аккумуляции и прилегающих участков: хвостохранилищ, мест складирования отвалов вскрышных пород, нижнего течения р. Эрдэнэтий-Гол. Общая площадь этих участков составляет 24 % (рис. 42 Б). В селитебной зоне с многоэтажной застройкой и северной части юрточной, вокруг ТЭЦ и коврового завода зафиксирована средняя степень геохимической нарушенности почв ($16 < Z_c < 32$), что составляет 11 % от площади горнопромышленного центра.

Таким образом, в обоих горнопромышленных центрах наибольшую техногенную геохимическую трансформацию испытывают поверхностные слои почв в промышленной зоне, особенно на территории предприятий и хвостохранилищ. В Закаменске, в результате отсутствия должных рекультивационных работ на хвостохранилищах и использовании их материала при создании и поддержании инфраструктуры города, площадь с максимальными значениями суммарного показателя загрязнения ($Z_c > 128$) составляет 22 % и захватывает значительную часть селитебной зоны с многоэтажной застройкой, а вместе с умеренным и высоким уровнем ($32 < Z_c < 128$) – более 50 %. В Эрдэнэнте к зоне с наибольшей степенью техногенной нарушенности можно отнести менее 1 % территории, которая располагается в пределах градообразующего предприятия. Так как размещение отходов в хвостохранилище тщательно контролируется, значения Z_c здесь не достигают критического уровня (Z_c = 109-118). В целом же горнопромышленный центр можно охарактеризовать как чистый, за исключением некоторых локальных зон аккумуляции.

6.2. Экологическая опасность загрязнения тяжелыми металлами и металлоидами почвенного покрова

Закаменск. Для большинства элементов нет законодательно утвержденных ПДК/ОДК в России, поэтому коэффициенты опасности (или по ГОСТу, кратности превышения ПДК) $K_o = C_a/ПДК$ рассчитаны только для V, Pb, As, Cd, Cu, Ni, Zn и Sb, при наличии для элемента и ПДК, и ОДК выбирался более жесткий норматив. Из перечня видно, что нормативно-правовая документация природноохранной направленности требует доработки, т.к. при оценке исследуемых территорий невозможно оценить влияние наиболее экологически значимых рудных элементов.

Во всех функциональных зонах наибольшую экологическую опасность представляют Pb, Sb, Cd и As (рис. 43 А), распределение которых в почвенном покрове определяется уровнем техногенной нагрузки и удаленностью от хвостохранилищ. В промышленной зоне K_o этих элементов составляет 7,8, 3,6, 2,1 и 1,7 соответственно, а в селитебной многоэтажной – 1,8, 0,5, 0,8 и 1,0. Основные источники ТМ во всех зонах – отходы ДВМК, так как промышленные руды Первомайского штокверка, Инкурского и Холтосонского месторождений, помимо добываемых элементов (W, Mo), содержат высокие концентрации Pb – от 400 до 5600 мг/кг и Zn – 380–3800 мг/кг (Зиновьева и др., 2011) . В сульфидном сливе обогатительной фабрики присутствуют также Cd и Pb (Смирнова, Плюснин, 2013). Почвы фоновых участков отличаются превышением ПДК As (K_o = 1,1) и V (1,1).

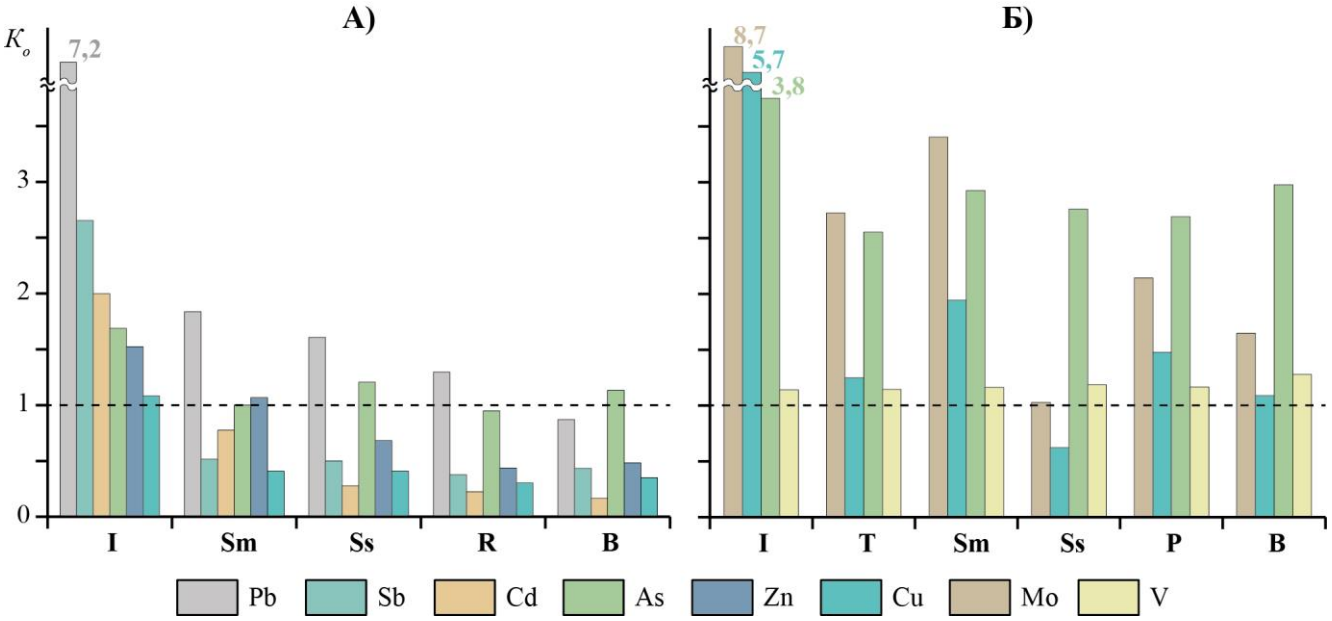


Рис. 43. Распределение коэффициентов опасности K_o в поверхностных горизонтах почв функциональных зон Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б) относительно региональных нормативов (пунктирная линия). Функциональные зоны: I – промышленная; T – транспортная; Sm и Ss – селитебные с многоэтажной и одноэтажной застройкой соответственно; R – природно-рекреационная; P – пастбища; B – фоновая.

Относительно международных санитарно-гигиенических нормативов (СП 11-102-97, 1997), наибольшее количество ТММ, средние концентрации которых выше допустимого уровня, но ниже требующего вмешательства (СП 11-102-97, 1997), выявлено в промышленной зоне (рис. 44 А) – Cd, Cu, Mo, Pb, Zn и Ni, где значения их коэффициентов опасности составляют 5, 4, 3,4, 2,7, 2,4 и 1,1 соответственно. В селитебной зоне с многоэтажной застройкой наибольшую экологическую опасность представляют Cd (K_o=1,9) , Zn (1,7), Cu (1,5), Ni (1,2). Наиболее чистыми являются почвы природно-рекреационной зоны и фона (рис. 44 А), где превышение норм выявлено только для Cu (K_o=1,1 и 1,3). Полученные результаты свидетельствуют о том, что поверхностный слой почв исследуемой территории по ряду элементов относится к загрязненным. Однако среднее содержание Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd и Pb ни в одной из функциональных

зон не превышает уровень, требующий экстренного вмешательства, за исключением точечной аномалии в пределах аварийного хвостохранилища, где значения коэффициентов опасности для Cu достигают 9,5, Cd – 3,6, Pb – 2,8, Mo – 2,4, As – 2,2, Zn – 1,9.

Опасность полиэлементного загрязнения поверхностных горизонтов почв в Закаменске оценивалась по интегральному показателю *ИПЗ*, который более контрастен, чем показатель Z_c – с разбросом значений от 1,5 до 1737 при среднем 93. Медианное значение, являющееся устойчивым к аномальным отклонениям, составляет 102, что свидетельствует об очень опасной экологической ситуации (табл. 4).

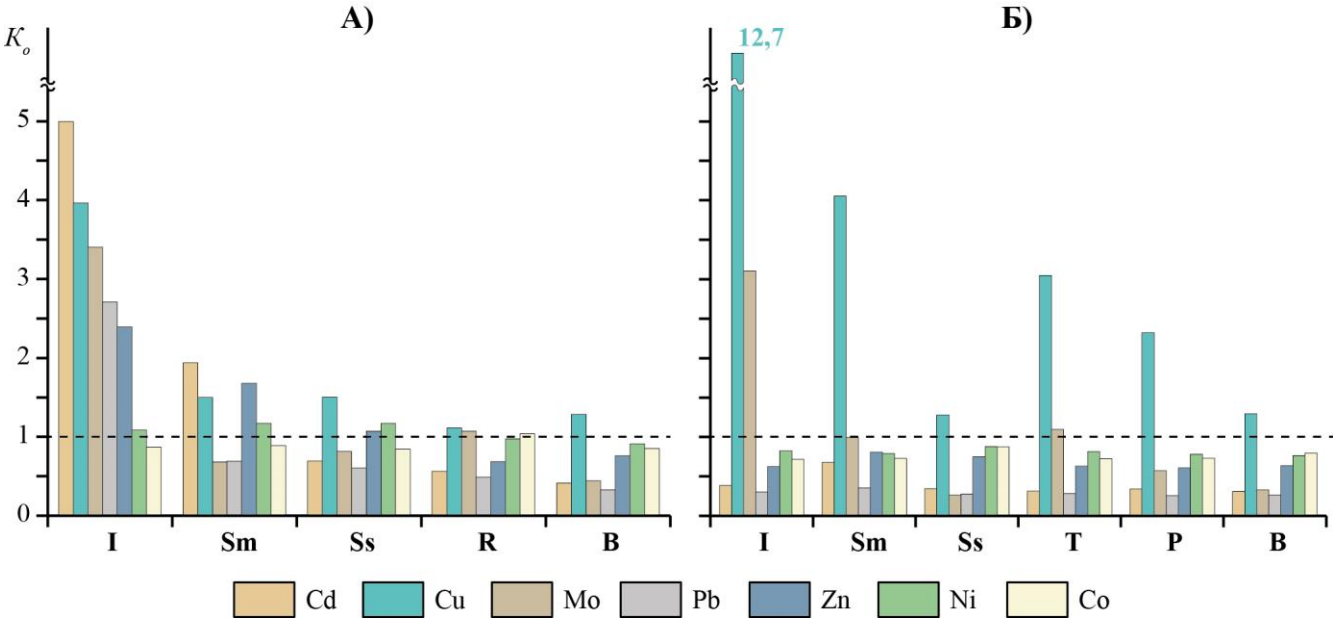


Рис. 44. Распределение коэффициентов опасности K_o в поверхностных горизонтах почв функциональных зон Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б) относительно международных нормативов (пунктирная линия). Функциональные зоны: I – промышленная; T – транспортная; Sm – селитебная с многоэтажной застройкой; Ss – селитебная с одноэтажной застройкой; R – природно-рекреационная; P – пастбища; B – фоновая.

Анализ пространственного распределения *ИПЗ* (рис. 45 А) выявил сходство с суммарным показателем загрязнения Z_c: первая и наиболее контрастная аномалия приурочена к аварийному хвостохранилищу (*ИПЗ*=823-1737); вторая – к Барун-Нарынскому и Зун-Нарынскому (647-851); третья – к Модонкульскому техногенному месторождению (400-740); четвертая – к территории ДВМК и Джидинскому хвостохранилищу (500-702); пятая находится в долине р. Инкур (300-330). Данный показатель позволяет выявить еще ряд территорий, относящихся к зоне с чрезвычайно опасной степенью загрязнения (рис. 45 А): юго-восточная часть горнопромышленного центра, у подножия отвалов вскрышных пород, из-под которых вытекает р. Гуджирка, где выявлена точечная аномалия с *ИПЗ* = 770; долина р. Модонкуль ниже хвостохранилищ, размыв и русловой транспорт материала которых образовал вытянутую с юга на север аномалию в верхних горизонтах пойменных почв, где во время половодья аккумулируются техногенные пески.

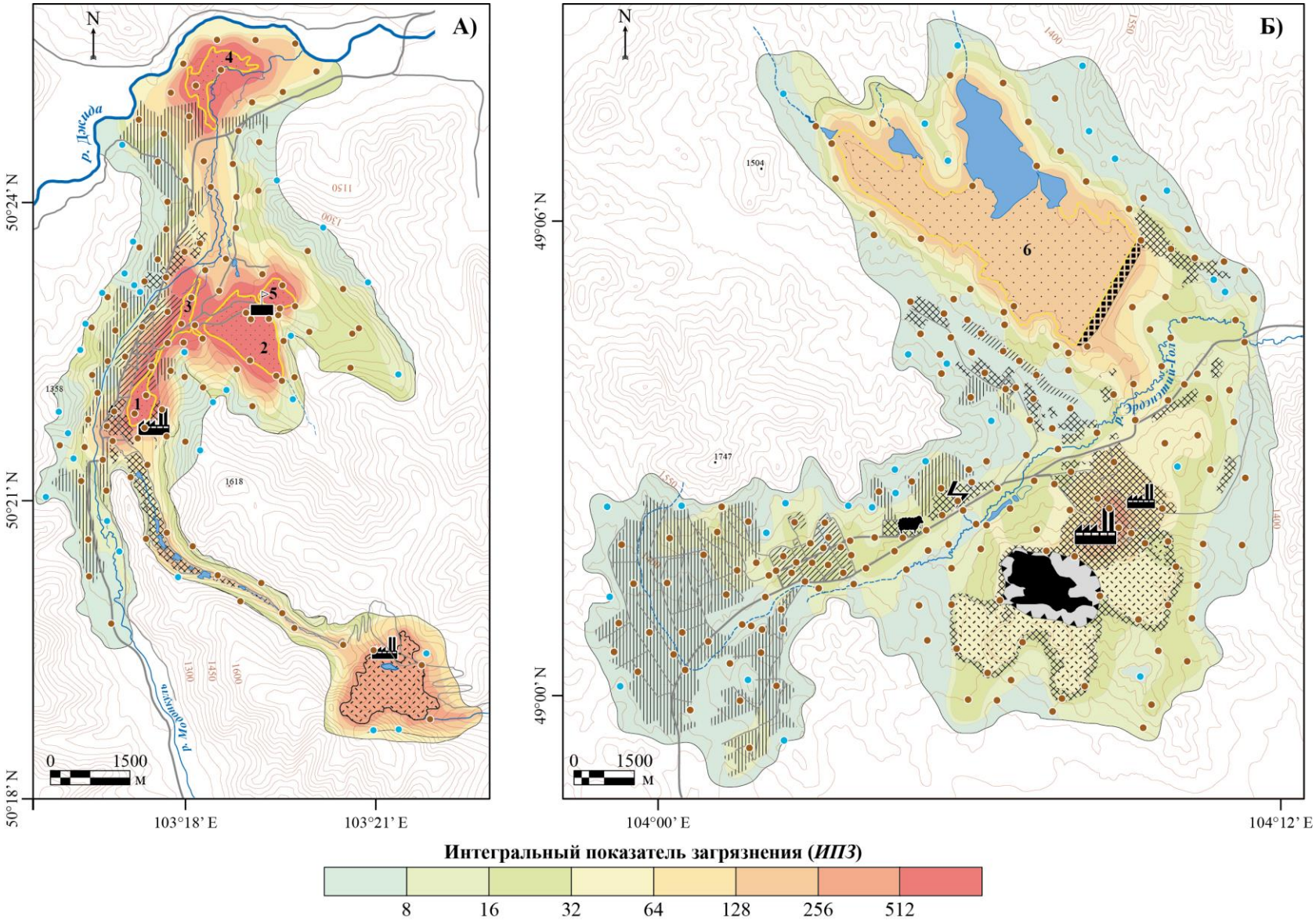


Рис. 45. Распределение интегрального показателя загрязнения *ИПЗ* в поверхностном слое почв Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б). Хвостохранилища: 1 – Джидинское; 2 – Барун-Нарынское; 3 – аварийное; 4 – Модонкульское; 5 – Зун-Нарынское; 6 – Эрдэнэтское

В зону чрезвычайной экологической опасности (*ИПЗ* > 128) попадает практически половина горнопромышленного центра – 47 % (рис. 46 А). Критическое состояние окружающей среды оказывает влияние на адаптационные реакции населения. Наблюдаются изменения показателей заболеваемости детей и подростков, сопровождающиеся снижением резистентности организма к патогенным факторам (Прусаков и др., 2005). На 8 и 10 % площади зафиксированы опасный (*ИПЗ* 32–64) и очень опасный (64–128) уровни загрязнения и лишь на 27 % территории – допустимый (*ИПЗ* < 16), который не оказывает негативного воздействия на здоровье человека.

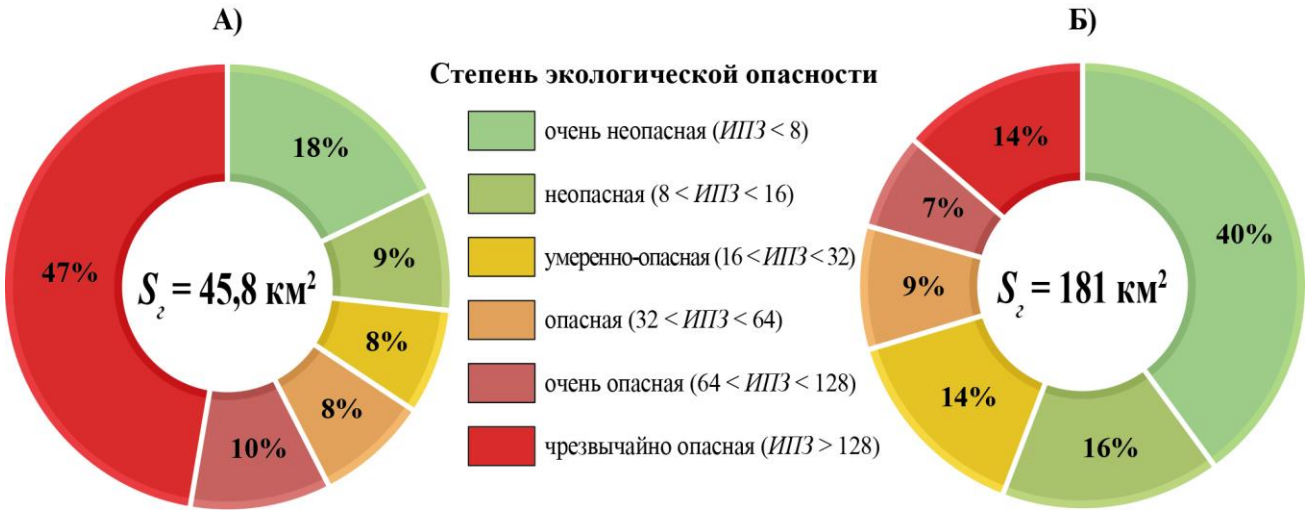


Рис. 46. Распределение площадей почв Закаменска (А) и Эрдэнэта (Б) по градациям *ИПЗ* . $S_г$ – общая площадь горнопромышленного центра

В 2001-2004 и 2008-2012 гг. по уровню заболеваемости детского населения Закаменска экологическую ситуацию в городе, кроме района Новостройки, можно отнести к зоне чрезвычайной экологической ситуации и экологического бедствия (Иметхенов и др., 2015). Однако судя по величине суммарного показателя загрязнения Z_c, только на 22% площади горнопромышленного центра он превышает 128. При анализе состояния здоровья населения и эколого-геохимической оценке в качестве показателя полиэлементного загрязнения почвенного покрова предпочтительнее использовать *ИПЗ*, который рассчитывается относительно среднемирового значения в почвах, поскольку горнопромышленные центры формируются в условиях высокой литолого-геохимической неоднородности и природной аномалии рудных элементов и их спутников. Этот показатель принимает во внимание не только негативное воздействие на здоровье населения загрязнения городской среды в результате антропогенной деятельности, но и неблагоприятные природные особенности территории, которые не учитывает суммарный показатель загрязнения.

Эрдэнэт. Для оценки экологической опасности загрязнения почв горнопромышленного центра концентрации ТММ в верхних горизонтах сопоставлены с региональными санитарно-гигиеническими нормативами, которые установлены для V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo,

Cd, Sn, Pb (Хөрсний Чанар..., 2008) и определяются в зависимости от гранулометрического состава. Гранулометрический анализ почвенных проб показал, что почвы преимущественно суглинистого состава, исключение составляет хвостохранилище, которое сложено супесчаными отложениями.

Анализ коэффициентов кратности превышения ПДК в функциональных зонах Эрдэнэта (рис. 43 Б) выявил наибольшее загрязнение почв в промышленной зоне. Для них характерны повышенные содержания Mo, Cu и As со средними значениями K_o 8,6, 5,7 и 3,8 соответственно. Точечный максимум со значениями K_o 525 для Cu, 290 для Mo и 218 для As расположен на территории предприятий «Эрдэнэт» и «Эрдмин».

В почвах всех функциональных зон зафиксировано повышенное содержание As с коэффициентами K_o 2,6–3,0. Распределение Mo и Cu дифференцировано в зависимости от антропогенной нагрузки – высокие средние значения K_o наблюдаются в селитебной зоне с многоэтажной застройкой (3,4 и 1,9 соответственно), а минимальные – в юрточной (1,03 и 0,62). Концентрации Zn, Cr, Sr, Se, Pb, Co, Ni, Cd, Sn не превышают ПДК, значения коэффициента K_o варьируют в пределах 7–77 % от ПДК, установленных законодательством Монголии. Таким образом, эти элементы не представляют экологической опасности для почв Эрдэнэта.

Относительно международных нормативов (СП 11-102-97, 1997) во всех функциональных зонах наибольшую опасность представляет Cu (рис. 44 Б), средние содержания которой в 2,3-12,7 раз превышают допустимый уровень, а в промышленной зоне – в 2,4 раза уровень, требующий вмешательства. Последнее свидетельствует о необходимости экстренных мер для снижения негативного воздействия на почвы. В промышленной и транспортной зонах в качестве экологически значимого загрязнителя выделяется и второй рудный элемент – Mo (рис. 44 Б) с коэффициентами опасности, достигающими 3,1 и 1,1 соответственно.

Анализ *ИПЗ* обнаружил довольно сильный разброс значений – от 0,4 до 2102 со средним 45. Медианное значение составляет 14,6,что свидетельствует об экологически неопасном уровне загрязнения (табл. 4). Так же, как и в Закаменске, распределение этого показателя повторяет таковое для Z_c (рис. 45 Б): максимальные средние (*ИПЗ*=150-441) и точечные (2102) значения приурочены к территории ГОК «Эрдэнэт» и предприятия «Эрдмин»; хвостохранилищу (*ИПЗ*=156-178); минимальные (< 16) – к селитебной зоне с одноэтажной (юрточной) застройкой и пастбищам. Отличие от распределения Z_c заключается в том, что для зоны многоэтажных жилых кварталов характерны не низкие, а средние значения показателя *ИПЗ* (16-32), область высоких значений *ИПЗ* (32-64) захватывает долину р. Эрдэнэтий-Гол на участке между ГОКом «Эрдэнэт» и хвостохранилищем, а также территорию вокруг отвалов вскрышной породы.

В зоне влияния ГОК «Эрдэнэт» 56 % исследуемой площади в юрточной зоне и на паст-

бищах (рис. 46 Б) характеризуется низким уровнем экологической опасности загрязнения почв (*ИПЗ*<16). В селитебной зоне с многоэтажной застройкой, которая занимает 14% площади горнопромышленного центра, значения *ИПЗ* 16-32 соответствуют среднему уровню загрязнения, а область сильного загрязнения (9%) с *ИПЗ* 32-64 захватывает долину р. Эрдэнэтий-Гол на участке между ГОКом «Эрдэнэт» и хвостохранилищем, а также участки вокруг отвалов вскрышной породы. Максимальный уровень экологической опасности (*ИПЗ*>128) установлен на 14% площади, причем 12% из них – это территория хвостохранилища, на которой человек бывает очень редко, и лишь 2 % занимает промплощадка ГОК «Эрдэнэт»

Таким образом, 50% территории Закаменска и 14% Эрдэнэта можно отнести к зоне чрезвычайной экологической опасности, требующей проведения ряда неотложных мер. В обоих горнопромышленных центрах особое внимание следует обратить на рекультивацию хвостохранилищ и техногенных месторождений путем изоляции или фиторемедиации отходов предприятий. При изоляции могут быть использованы способы закрепления высохших песков битумной эмульсией, жидким стеклом, смолами и другими вяжущими веществами, препятствующими развеиванию и вымыванию токсичных металлов (Синица, 2008). Фиторемедиация предполагает посадку растений-«гипераккумуляторов», которые, во-первых, препятствуют дефляции и делювиальному смыву материала разрушающейся плотины и поверхности Барун-Нарынского, Эрдэнэтского и других хвостохранилищ, во-вторых, извлекают из почвы и концентрируют в наземных органах ТММ (Копцик, 2014). Уборка фитомассы приведет к постепенному снижению опасных концентраций поллютантов в почвах. Для контроля за накоплением ТММ целесообразна организация экологического мониторинга действующих Зун-Нарынского и Эрдэнэтского хвостохранилищ и прилегающих территорий.

6.3. Техногенная биогеохимическая трансформация растений

Последствия техногенного воздействия на древесные растения оценивались на основе интегрального показателя Z_v. Так как в пределах горнопромышленного центра древесная растительность и, как следствие, точки пробоотбора расположены неравномерно, представленные карты (рис. 47,рис. 48) показывают лишь основные пространственные тренды полиэлементного загрязнения растений.

Закаменск. Хвойная и лиственная породы отличаются совершенно различным распределением коэффициента биогеохимической трансформации Z_v (рис. 47). Хвоя лиственницы характеризуется наиболее высокими значениями – среднее значение показателя Z_v составляет 95, что определяет уровень техногенной трансформации ее микроэлементного состава как чрезвычайно высокий. Для листьев березы этот показатель равен 46, что соответствует очень высокому уровню. Основной вклад в величину Z_v для хвои вносят $Cr^{19}W^{16}V^{14}Pb^{12}Bi^{9}Mo^{8}Sb^{7}Ni^{6,5}Cd^{4,3}Co^{3,3}$

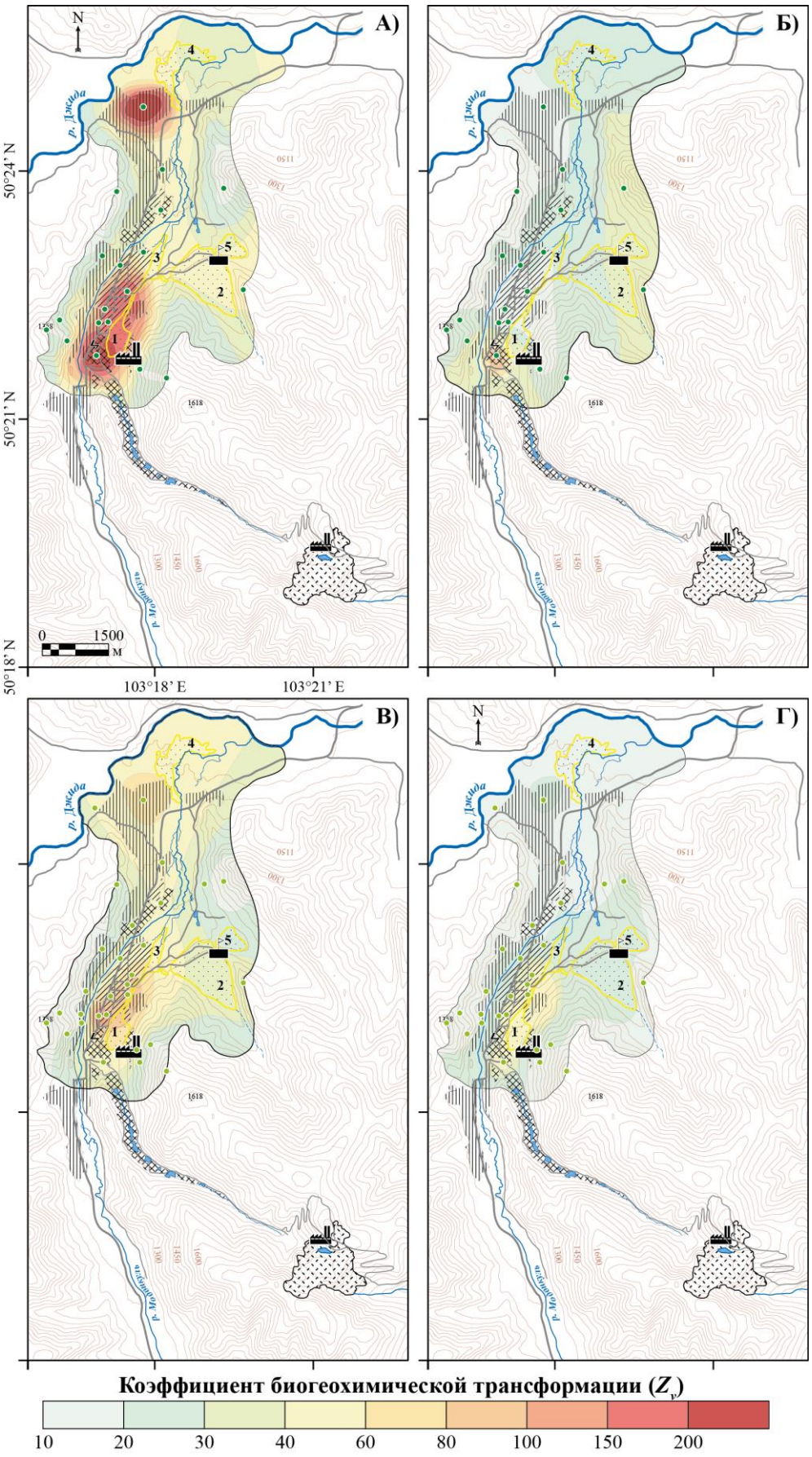


Рис. 47. Степень биогеохимической трансформации (Z_v) хвои (А) и коры (Б) лиственницы сибирской, листьев (В) и коры (Г) березы плосколистной на территории Закаменска. Хвостохранилища: 1 – Джидинское; 2 – Барун-Нарынское; 3 – аварийное; 4 – Модонкульское; 5 – Зун-Нарынское

$Sn^{2,5}$, для листьев березы – $W^{8}V^{7}Mo^{7}Bi^{5,9}Pb^{5,4}Sb^{4,5}$ $Cd^{2,1}Co^{2}$ (в верних индексах – средние по горнопромышленному центру значения EF_I). Помимо общих для двух видов элементов, хвоя отличается интенсивной аккумуляцией Cr, Ni и Sn.

На изучаемой территории выделяются две устойчивые биогеохимические аномалии в центре и на севере горнопромышленного центра (рис. 47 А, В). Первая сформировалась в промышленной и селитебной зонах, где значения Z_v для хвои достигают 320 и 205, а для березы – 100 и 71, соответственно. В ней накапливаются поллютанты из нескольких источников: Джидинского хвостохранилища, материал которого подвержен активной эрозии и дефляции; ТЭЦ, работающей на мазуте, завода «Литейщик», где ведется литье чугуна, стали, бронзы и вторичная переработка металлолома, и автотранспорта. Содержащиеся в выбросах и стоках предприятий ТММ поглощаются деревьями из почв и сорбируются из воздуха.

Вторая аномалия, где значения Z_v для хвои лиственницы достигают 260, а для листьев березы – 72, приурочена к селитебной зоне на севере, к юго-западу от техногенного Модонкульского месторождения лежалых песков. Она сформировалась в результате преимущественно аэрогенного поступления МЭ. Местные метеоусловия отличаются частыми и довольно сильными ветрами (до 20 м/с), а узкая долина р. Модонкуль с высокими бортами, способствует развитию эффекта «каньона» и переносу тонких частиц от мест складирования отходов ДВМК. Таким образом, основным фактором бионакопления поллютантов является осаждение обогащенных W, Mo, Pb, Bi, Cd, Sb, V тонкодисперсных частиц на поверхности ассимилирующих органов растений, причем наибольшие концентрации свойственны лиственице сибирской, у которой на поверхности иголок имеется восковой слой, способствующий прочной фиксации поллютантов (Aznar и др., 2009; Gandois, Probst, 2012; Lin и др., 1995; Liu и др., 2006; Muller, Riederer, 2005; Raitio, Tuovinen, Anttila, 1995; Rautio, Huttunen, 2003; Trimbacher, Weiss, 2004).

Многолетние органы древесной растительности накапливают поллютанты значительно слабее – значения показателя Z_v у них заметно ниже, чем у ассимилирующих органов. Для лиственницы Z_v в среднем равен 30, для березы – 25, что определяет уровень биогеохимической трансформации как высокий и средний соответственно. Основной вклад вносят W–Pb–Bi (EF_I=3–7,5), Cd–Mo–Zn (1,7–3). Максимальных значений показатель Z_v – 85 для лиственницы и 55 для березы – достигает в аномальной зоне на юге горнопромышленного центра, в непосредственной близости от завода «Литейщик» и ТЭЦ.

Эрдэнэт. Ассимилирующие органы в пределах зоны влияния ГОК «Эрдэнэт» имеют невысокие значения коэффициента биогеохимической трансформации. Среднее значение по горнопромышленному центру для хвои лиственницы сибирской составляет 29, для листьев тополя – 20, что определяет уровень техногенной трансформации микроэлементного состава древесной растительности как средний. Основной вклад в величину Z_v вносят $V^{3,2}As^{3,1}Pb^{2,9}Mo^{2,6}Cu^{2,5}Bi^{2,2}$

$Mn^{2,1}Co^{2,1}$ и $Sb^{6,2}Cd^{5}$ $V^{3,7}As^{2,9}Ni^{2,4}Mo^{2,2}$, соответственно (в верних индексах – средние по горнопромышленному центру значения EF_l).

В пределах Эрдэнэта выделяется одна устойчивая аномалия в промышленной зоне, которая фиксируется только в хвое лиственницы сибирской (рис. 48 А), что обусловлено, как отмечалось ранее, физиологическими особенностями ассимилирующих органов – на хвое имеется восковой слой кутикулы, который прочно связывает МЭ. Значения в ней коэффициента Z_v достигают 54,4, что определяет уровень техногенной трансформации как очень высокий. Основной вклад вносят As, Cu, Mo, Pb, Bi, повышенные концентрации которых также выявлены в используемом на ТЭЦ угле. Слабоконтрастная аномалия выявлена в селитебной зоне с городской застройкой, где значения Z_v составляют 20-30 с локальными аномалиями до 48. Основной вклад вносят наиболее типичные загрязнители от автотранспорта Zn, Pb, As (табл. 8).

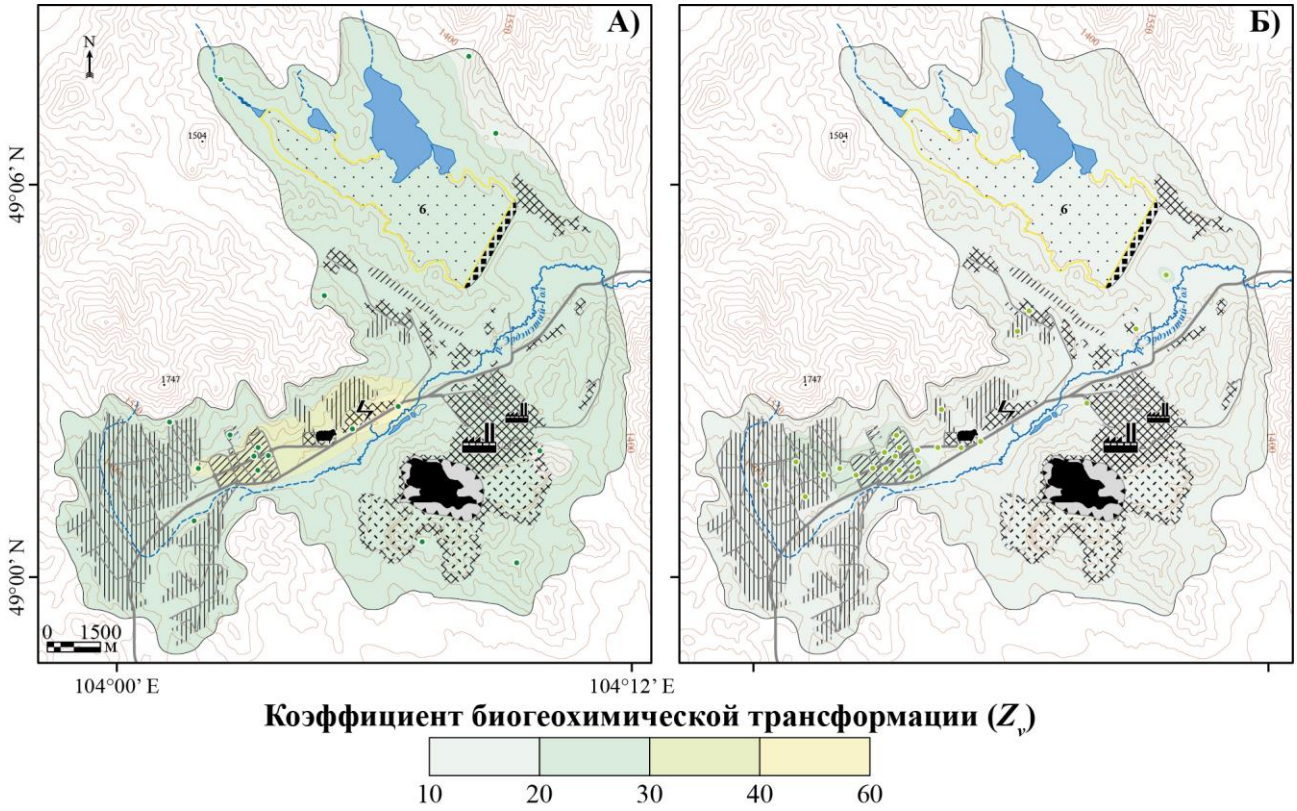


Рис. 48. Степень биогеохимической трансформации хвои (А) лиственницы сибирской и листьев (Б) тополя на территории Эрдэнэта (по коэффициенту Z_v)

Таким образом, древесная растительность в пределах Закаменска, в отличие от Эрдэнэта, подвержена чрезвычайно высокому уровню воздействия, особенно это проявляется при анализе ассимилирующих органов, которые показывают формирование новой зоны воздействия на севере горнопромышленного центра, где образовалось техногенное Модонкульское месторождение песков. Многолетние органы отражают постоянное длительное воздействие ДВМК и мест складирования отходов, а также ТЭЦ и завода Литейщик, вызвавшее формирование аномальной зоны в непосредственной близости от этих источников поллютантов. В зоне влияния

ГОКа «Эрдэнэт» МЭ состав растительности в целом не подвержен техногенной трансформации, что обусловлено наличием производственного контроля над горной разработкой, технологическим процессом извлечения полезных компонентов из породы и размещением отходов производства. Исключением является локальная аномалия в непосредственной близости от ТЭЦ, с накопление МЭ, повышенные содержания которых выявлены и в используемом на предприятии буром угле.

6.4. Экологическое состояние растений

Закаменск. Отношение Fe/Mn является индикатором фотосинтеза с оптимальным диапазоном 1,5-2,5, необходимым для нормального развития растений (Kabata-Pendias, 2011). Железо является одним из макроэлементов и играет ведущую роль среди всех содержащихся в растениях металлов. Оно входит в состав органических веществ, необходимых для протекания биохимических процессов дыхания и фотосинтеза. Недостаток железа наблюдается преимущественно в карбонатных почвах или с щелочной реакцией среды, где высокие величины *pH* препятствуют его поглощению (Копылова, 2010). Марганец принимает активное участие в обмене веществ, улучшает физиологические процессы. Он входит в состав ферментов, повышает их активность. Участвует в окислительных процессах, в восстановлении нитратов при фотосинтезе. Как избыток, так и недостаток Mn неблагоприятно сказывается на растениях (Власюк, 1969; Копылова, Якимова, 2013; Школьник, 1974; Физиология …, 1988).

Ассимилирующие органы древесных растений в Закаменске характеризуются различными значениями Fe/Mn в зависимости от уровня антропогенной нагрузки (табл. 20). В хвое оно изменяется от 0,11 на фоновых территориях до 4,7 в селитебной зоне. Максимальные значения (12,3) приурочены к последней из-за резкого дефицита Mn и избытка активного закисного Fe, вызывающего хлороз у растений вследствие отравления железом (Копылова, 2010) и их стрессовое состояние (Лянгузова, 2010). Близкое к оптимуму соотношение Fe/Mn = 1,75 выявлено только в промышленной зоне.

Обратная ситуация – высокая концентрация Mn – приводит к понижению концентрации активного закисного Fe, которое мобилизуется в клетках в виде окисного органофосфорного соединения, в результате чего наступает хлороз, вызванный недостатком Fe (Копылова, 2010). Такая ситуация характерна для фоновых и природно-рекреационных ландшафтов, где отношение Fe/Mn в хвое составляет 0,11-0,22. Листья березы во всех функциональных зонах испытывают резкий недостаток Fe и избыток Mn (Fe/Mn=0,11-0,63). Максимальные значения Fe/Mn находятся в пределах оптимального диапазона – 2,4.

Соотношение Fe/Mn в многолетних и ассимилирующих органах древесных растений имеет общие черты. Минимальные значения Fe/Mn в коре лиственницы обнаружены в природ-

но-рекреационных (0,97) и фоновых (1,99) условиях. При увеличении уровня антропогенной нагрузки отношение Fe/Mn довольно резко изменяется: в селитебной зоне оно составляет 4,5, в промышленной – 5,7, что превышает верхнюю границу оптимума в 1,8 и 2,3 раза соответственно. Подобные же значения были получены и при изучении лесных экосистем в зоне влияния комбината «Североникель» в Кольской Субарктике (Копцик и др., 2016). Кора березы отличается еще более резким, чем листья недостатком Fe и избытком Mn. Отношение Fe/Mn в природно-рекреационной зоне составляет в среднем 0,02, что в 75 раз ниже нижней границы оптимума. Во всех остальных функциональных зонах оно колеблется от 0,04 до 0,21.

Таблица 20. Показатели экологического состояния ассимилирующих и многолетних органов древесных растений в различных функциональных зонах Закаменска

Ф-ная зона	Показатель					
	Fe/Mn		Pb/Mn		Cu/Zn	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
Хвоя лиственницы сибирской						
B	0,11	0,06-0,17	0,0005	0,0002-0,0008	0,29	0,28-0,31
R	0,22	0,06-0,56	0,002	0,0004-0,005	0,31	0,28-0,34
S	4,68	0,41-12,37	0,042	0,003-0,125	0,29	0,2-0,36
I	1,75	0,68-2,82	0,011	0,006-0,34	0,28	0,23-0,34
Листья березы плосколистной						
B	0,11	0,08-0,16	0,0004	0,0003-0,0004	0,07	0,05-0,1
R	0,14	0,07-0,4	0,001	0,0002-0,002	0,07	0,03-0,11
S	0,56	0,09-1,62	0,006	0,0006-0,032	0,05	0,03-0,1
I	0,63	0,08-2,39	0,002	0,0004-0,003	0,03	0,03-0,05
Кора лиственницы сибирской						
B	1,99	0,25-3,4	0,02	0,002-0,031	0,37	0,3-0,44
R	0,97	0,25-1,7	0,02	0,002-0,05	0,37	0,26-0,56
S	4,49	1,5-10,8	0,05	0,005-0,12	0,42	0,21-0,99
I	5,68	0,8-10,6	0,06	0,008-0,11	0,62	0,58-0,67
Кора березы плосколистной						
B	0,04	0,02-0,06	0,0004	0,0003-0,0004	0,06	0,04-0,07
R	0,02	0,01-0,06	0,0004	0,00004-0,0008	0,07	0,04-0,1
S	0,21	0,01-1,6	0,002	0,0001-0,006	0,05	0,03-0,1
I	0,13	0,01-0,5	0,001	0,0003-0,004	0,05	0,04-0,06

Примечание. B – фоновые территории; функциональные зоны горнопромышленного центра: R – природно-рекреационная, S – селитебная, I – промышленная.

Максимально допустимая концентрация Fe – 240 мг/кг сухой массы (Копылова, 2011; Прохорова, Матвеев, Павловский, 1998) – превышена в ассимилирующих органах деревьев в промышленной и окружающей ее селитебной зонах, в коре лиственницы практически во всех пробах, а в коре березы – только в промзоне. Критическая концентрация – 750 мг/кг сухой массы (Копылова, 2011; Прохорова, Матвеев, Павловский, 1998) – превышена в локальных аномалиях: в коре лиственницы – в промышленной, достигая значений 1800 мг/кг, и селитебной зонах, в хвое – в селитебной. Фитотоксичная концентрация Mn для древесных растений составля-

ет 500 мг/кг сухой массы (Казанцев, 2008; Прохорова, Матвеев, Павловский, 1998). Ее превышение выявлено у березы во всех органах и во всех функциональных зонах, а у лиственницы – только в ассимилирующих органах на фоновых и природно-рекреационных территориях. Бионакопление Mn при отсутствии или минимальном уровне антропогенного воздействия, скорее всего, связано с тем, что в условиях кислой среды, при pH<5,7, этот элемент переходит в наиболее подвижную и доступную для растений форму Mn^{2+} (Кулагин, Шагиева, 2005). Известно, что лиственница сибирская имеет «ферралистный» состав золы и является концентратором этого элемента (Башкин, Касимов, 2004; Касимов, Евдокимова, Казанцева, 1989), а в листьях березы в условиях горнопромышленного центра снижается уровень железа и одновременно возрастает Mn. Подобное нарушение в соотношении элементов-антагонистов в ассимилирующих органах при техногенном загрязнении отмечалось и другими авторами (Гиниятуллин и др., 1997; Копылова, 2002; Копылова, Якимова, 2013; Alvarez-Tinaut, Leal, Martinez, 1980; Kabata-Pendias, 2011).

Отношение Pb/Mn характеризует соотношение техногенного и биофильного элементов, т.е. уровень техногенной нагрузки. Оптимум для незагрязненной растительности суши получен путем деления кларков этих элементов (Добровольский, 2003), он составляет 0,006, что свидетельствует об очень малой доле техногенных элементов, не участвующих в физиологических процессах, в микроэлементном составе растений. Избыток Pb в растениях ингибирует дыхание и подавляет процесс фотосинтеза, что связано с нарушением реакций переноса электронов (Kabata-Pendias, 2011).

Ассимилирующие органы березы во всех функциональных зонах Закаменска практически не испытывают техногенного пресса, т.к. средние значения отношения Pb/Mn составляют 0,0004-0,006. Выявлена локальная аномалия с максимумом 0,032 в селитебной зоне вблизи основной транспортной артерии – ул. Ленина, которая является источником Pb. У хвои лиственницы минимальные значения Pb/Mn выявлены в фоновых (0,0005) и природно-рекреационных (0,002) условиях, а максимальные приурочены к селитебной зоне, где среднее Pb/Mn составляет 0,04, а точечное – 0,339, что более чем в 6 и 55 раз соответственно превышает уровень для незагрязненной растительности.

Многолетние органы, как правило, аккумулируют более значительные количества поллютантов (Щербенко и др., 2008). Отношение Pb/Mn показывает, что с ростом техногенной нагрузки происходит повышение содержания Pb. Однако в коре березы во всех функциональных зонах рассматриваемый показатель не превышает уровень для незагрязненной растительности (0,0004-0,002). В отличие от нее, кора лиственницы сибирской характеризуется минимальными средними значениями в фоновых условиях 0,02 и максимальным – в промышленной зоне 0,06, достигая в локальных аномалиях величины 0,119, что в 20 раз выше нормального

уровня.

Максимально допустимая концентрация Pb составляет 0,5-1,2 мг/кг сухого вещества (Сибиркина, 2014), однако, критическое содержание для древесных растений точно не установлено. Для большинства культурных растений превышение уровня 10 мг/кг сухого вещества считается критичным (Рэуце, Кырстя, 1986; Тарабрин, 1974; Baker, Chesnin, 1975). При этом Pb по сравнению с другими МЭ представляет меньшую опасность, т.к. прочно удерживается органическими и минеральными коллоидами (Kabata-Pendias, 2011; Vega и др., 2007). Невысокая фитотоксичность этого элемента объясняется также наличием в растениях хорошо действующей системы инактивации.

Сравнение содержания Pb в древесной растительности различных функциональных зон Закаменска с максимально допустимой концентрацией (рис. 49 А) показало, что наибольший техногенный пресс испытывает кора лиственницы сибирской, в которой средние концентрации Pb составляют 5,8-9,9 мг/кг, а в локальных аномалиях селитебной и промышленной зон достигают 25 и 19 мг/кг соответственно. Первая располагается в центре горнопромышленного центра, рядом с р. Модонкуль, где в летний период действует брод через реку. Источником Pb является, скорее всего, масла, бензин и выхлопы автотранспорта.

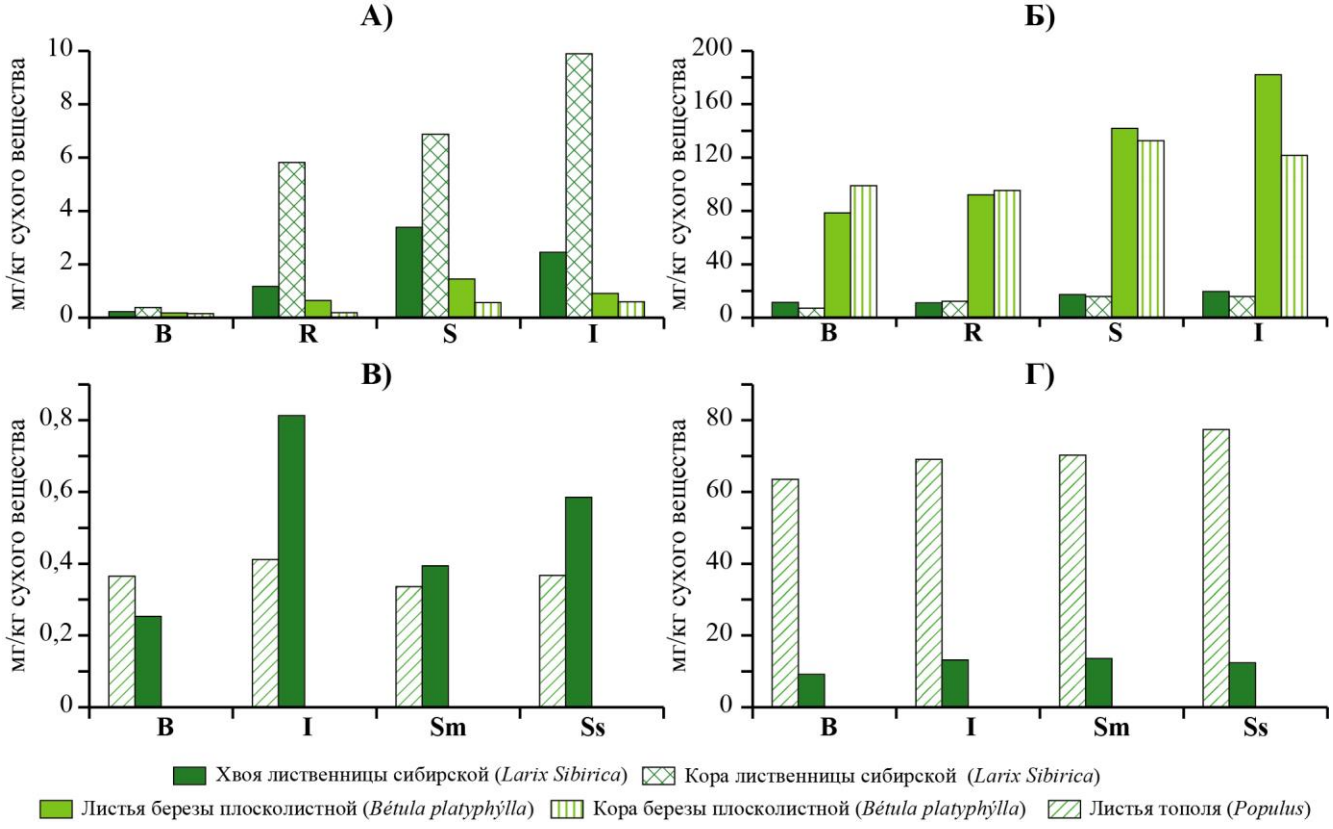


Рис. 49. Средние содержания Pb (А, В) и Zn (Б, Г) в ассимилирующих и многолетних органах древесных растений в различных функциональных зонах Закаменска (А, Б) и Эрдэнэта (В, Г). Функциональные зоны: B – фоновые, R – природно-рекреационная, I – промышленная, S - селитебная; Sm и Ss – селитебная с многоэтажной и одноэтажной застройкой

Во второй аномалии источником являются выбросы завода «Литейщик» и ТЭЦ. Активное бионакопление Pb обусловлено механическим осаждением загрязненной пыли на поверхности коры благодаря ее шероховатой структуре. В хвое лиственницы наибольшие средние значения характерны для селитебной зоны (3,3 мг/кг), повышаясь в локальных аномалиях до 9,1 мг/кг. Листья и кора березы характеризуются в целом низкими концентрациями Pb во всех зонах, за исключением селитебной, где содержание в листьях достигает 1,5 мг/кг.

Отношение Cu/Zn определяет степень пропорциональности в обеспечении этими биометаллами процессов ферментосинтеза. Оптимальной Cu/Zn для незагрязненной растительности суши является величина 0,27 (Елпатьевский, Аржанова, 1990; Kosheleva et al., 2016). Медь играет важную роль в физиологических процессах: фотосинтезе, синтезе гемоглобина, дыхании, перераспределении углеводов, восстановлении и фиксации азота, метаболизме протеинов и клеточных стенок и др. (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Столь разносторонние функции объясняются способностью Cu менять валентность, также как и Fe, Mn и Zn (Битюцкий, 2011; Ильин, Сысо, 2001). Этот элемент, наряду с Zn, отвечает за процессы репродукции. В ассимилирующих и многолетних органах березы плосколистной во всех функциональных зонах Закаменска средние отношения Cu/Zn составили 0,03-0,07, что вызвано высокими концентрациями Zn в растениях (табл. 20). Хвоя лиственницы обладает близкими к оптимуму значениями – 0,28-0,31 при различных уровнях антропогенной нагрузки. Наибольший дисбаланс в обеспечении процессов синтеза ферментов испытывают древесные растения селитебной зоны (0,36). Величины Cu/Zn в коре лиственницы распределены аналогично: минимальные значения (0,37), в 1,4 раза превышающие оптимальные, приурочены к фоновым и природно-рекреационным ландшафтам, максимальные (0,62) – к селитебной зоне. В промзоне в точечных аномалиях соотношение Cu/Zn достигает 0,99, что говорит об отсутствии баланса в обеспечении синтеза ферментов.

Корреляционный анализ обнаружил положительную связь между концентрациями Cu и Zn в ассимилирующих органах березы и лиственницы (r=0,65 и 0,88 соответственно). Это не согласуется с ранее опубликованными данными о том, что Cu и Zn являются антагонистами, каждый из них может вследствие взаимной конкуренции ингибировать поглощение другого корневой системой, поскольку механизм поглощения этих металлов один и тот же (Ринькис, 1972; Graham, 1981; Kabata-Pendias, 2011). Подобное противоречие можно объяснить тем, что полученные отношения Cu/Zn незначительно или вовсе не превышают оптимальные для незагрязненной растительности суши, а также тем, что основное поступление МЭ происходит в результате выпадений из атмосферы, роль корневого поглощения незначительна. Для многолетних органов березы и лиственницы корреляционная зависимость такая же, значения r 0,56 и 0,57 значимы при длинах выборок n = 21 и 32 соответственно.

Cu относят к истинным биоэлементам, так как она всегда присутствует в почвах, расте-

ниях, тканях животных и участвует в разнообразных метаболических реакциях. Она входит в состав пластоцианина, осуществляющего перенос электронов между фотосистемой II и фотосистемой I, входит в состав медьсодержащих белков и ферментов, которые катализируют окисление аскорбиновой кислоты, дифенолов и гидроксилирование монофенолов (Кулагин, Шагиева, 2005). Критическое значение Cu – 20 мг/кг сухого вещества (Казанцев, 2008). Средние значения в ассимилирующих и многолетних органах древесных растений в различных функциональных зонах Закаменска ниже фитотоксичного значения – 3,2-9,4 мг/кг. Максимальная концентрация 15 мг/кг в хвое лиственницы зафиксирована в локальной аномалии в промышленной зоне.

Zn участвует в окислительно-восстановительных процессах в растениях, стабилизирует воздушный обмен, влияет на фотосинтез, образует аминокислоты триптофана (Кулагин, Шагиева, 2005). Фитотоксичная концентрация составляет 300 мг/кг сухого вещества, которая в пределах исследуемой территории не превышена. С ростом антропогенной нагрузки во всех органах древесных растений содержание Zn увеличивается (рис. 49 Б): минимальные значения (7,2-99 мг/кг) обнаружены в фоновых и природно-рекреационных условиях, а максимальные – в промышленной зоне (19,5-182). Береза, в отличие от лиственницы, является более активным концентратором Zn: средние концентрации в листьях и коре березы варьируют в диапазоне 78,5-182 и 99-132 мг/кг сухого вещества соответственно, для хвои и коры лиственницы он составляет 11,5-19,5 и 7,2-15,8. Наибольшие концентрации Zn характерны для ассимилирующих органов березы. Так как при пробоподготовке листья березы промывались водой, то основным источником, скорее всего, являются загрязненные почвы. Подобные результаты были получены и другими исследователями при изучении МЭ в древесных породах Европы (Brekken, Steinnes, 2004; Kopponen et al., 2001; Lobersli, Steinnes, 1988; Marguí и др., 2007; Ohlson, Staaland, 2001; Steinnes et al., 2000).

Онтогенетическая специализация. Зольность хвои в фоновых условиях составляет 3,2-3,3% и является нормальной относительно средней зольности хвойных растений (Безуглова, Орлов, 2000; Никитин, Оболенская, Щеголев, 1978; Чудинов, Тюриков, Зубань, 1965). Зольность коры в среднем в два раза ниже, чем хвои – 1,3-1,8%. Распределение по органам всех рассматриваемых элементов (рис. 50), за исключением Mn, относится к акропетальному типу (Сабинин, 1971), поскольку их содержание в золе коры значительно выше, чем в золе хвои ($Ак_{листв.}$=0,03-0,77). Mn распределен по базипетальному типу, он накапливается в основном в ассимилирующих органах ($Ак_{листв.}$=1,6), что связано с его ведущей ролью в процессе фотосинтеза и создания окислительно-восстановительных условий в клетках (Авессаломова, 2007). При оценке распределения МЭ по органам березы плосколистной использованы значения зольности для листьев (Кавеленова, Здетоветский, Огневенко, 2001) и коры (Юсупов, 2013) в фоновых условиях, равные 5,85 и 0,6 % соответственно. Также как и для лиственницы, большинство

элементов имеют акропетальное распределение (рис. 50) Mo, Co, Cr, W, Cd, Bi, Pb, Sb, As, Mn, Sn, Cu, Zn, V ($Ак_{березы}$=0,02-0,89), базипетальное имеют лишь Sr, Ba и Ni ($Ак_{березы}$=1,1-1,7).

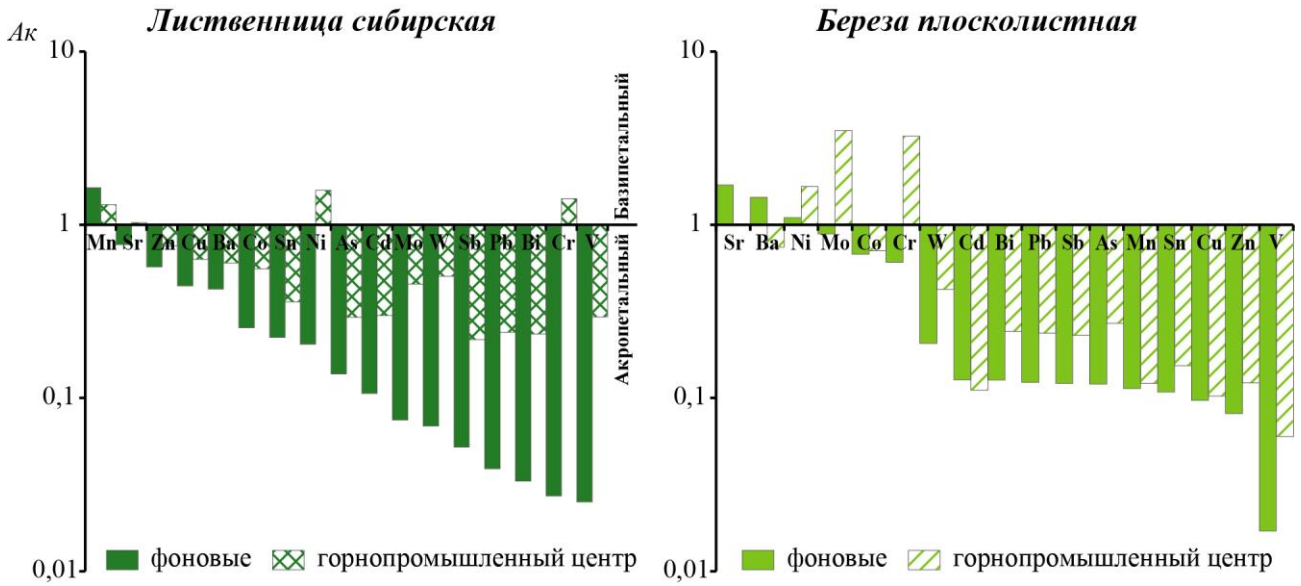


Рис. 50. Распределение коэффициента акропетальности *Ак* в различных видах древесных растений Закаменска

В пределах Закаменска произошло изменение онтогенетической специализации древесных растений. Анализ коэффициента акропетальности показал, что особенно активно МЭ накапливаются в ассимилирующих органах хвойных и лиственных растений. Значения *Ак* в пределах горнопромышленного центра возрастают в 1,5-52 раза, что свидетельствует о том, что растения испытывают экологический стресс (Авессаломова, 2007; Фортескью, 1985). В лиственнице сибирской у Sr, Ni, Cr сменился тип распределения с акропетального в фоновых условиях на базипетальный (рис. 50). Подобное же выявлено и у Cr и Mo в березе плосколистной. Анализ геохимических спектров показал, что в ассимилирующих органах лиственницы сибирской более активно накапливаются токсичные элементы под сравнению с эссенциальными (табл. 21), основной вклад вносят Cr, V, Ni, W, Bi, Pb, Mo, Sb, Cd, Co, As, а для березы плосколистной – Cr, Mo, V, As, W.

Эрдэнэт. Отношение Fe/Mn. Ассимилирующие органы древесных растений в Эрдэнэте характеризуются различными значениями Fe/Mn в зависимости от функциональной зоны (табл. 22). Наиболее близкие к оптимальному соотношения 1,5-2,4 установлены для листьев тополя в фоновых ландшафтах. В промышленной зоне значения Fe/Mn максимальны (8,9) из-за дефицита Mn и накопления закисного Fe, что приводит к хлорозу вследствие отравления железом (Копылова, 2010). В хвое лиственницы сибирской картина иная: наибольшие средние значения (11,7) характерны для селитебной зоны с многоэтажной застройкой, а максимальные (26,3) – к селитебной с одноэтажной. Последнее обусловливает явные признаки хлороза ассимилирующих органов, что проявляется в отмирании и осыпании хвои без видимых причин. Обратная си-

туация – дефицит Fe и избыток Mn – наблюдалась в единичных точках в промышленной зоне (0,68).

Таблица 21. Коэффициенты акропетальности (*Ак*) в пределах зоны влияния ДВМК и фоновых условий

Органы древесных растений	Тип распределения МЭ в древесных растениях					
	Акропетальный				Базипетальный	
Ак	<0,1	0,1-0,3	0,3-0,5	0,5-1	1-2	>2
Лиственница сибирская						
Фон	V, Cr, Bi, Pb, Sb, W, Mo	Cd, As, Ni, Sn, Co	Ba, Cu	Zn, Sr	Mn	
Горнопромышленный центр		Sb, Bi, Pb, As, V, Cd	Sn, Mo	W, Co, Ba, Cu, Zn,	Sr, Mn, Cr, Ni	
Береза плосколистная						
Фон	V, Zn, Cu	Sn, Mn, As, Sb, Pb, Bi, Cd, W		Cr, Co, Mo	Ni, Ba, Sr	
Горнопромышленный центр	V	Cu, Cd, Mn, Zn, Sn, Sb, Pb, Bi, As	W	Co, Ba	Sr, Ni	Cr, Mo

Максимально допустимая концентрация Fe превышена в нескольких точках для листьев тополя в промышленной и селитебных зонах с многоэтажной и одноэтажной застройками. В хвое лиственницы в большинстве отобранных проб (в 9 из 14) обнаружено превышение максимальной допустимой концентрации (240 мг/кг). Критическая концентрация (750 мг/кг) превышена в локальной аномалии в хвое лиственницы (840 мг/кг) в селитебной зоне с одноэтажной застройкой. Ассимилирующие органы древесных растений характеризуются довольно низкими значениями содержания Mn со средними значениями для хвои 84 и 69 мг/кг для листьев, что считается нормой (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989), но ниже чем в Закаменске. Снижение поглощения Mn из почвы связано с тем, что в условиях нейтральной и слабощелочной реакции среды, характерных для исследуемых ландшафтов, этот элемент переходит в менее подвижную форму (Сибиркина, 2014), а также с избыточным количеством элемента-антагониста Fe. Аналогичные результаты – повышенное накопление Fe и снижение концентраций Mn в условиях антропогенного воздействия – описаны и другими авторами (Уфимцева, Терехина, 2005).

Отношение Pb/Mn. Ассимилирующие органы тополя во всех функциональных зонах, за исключением промышленной, не испытывают техногенного пресса, т.к. разброс средних значений Pb/Mn составляет от 0,0042 в селитебной с многоэтажной застройкой до 0,0057 в фоновых условиях. Наибольшее среднее отношение (0,0065) выявлено в промзоне. В ней же, у северо-восточной границы ТЭЦ, отмечается максимальное значение в точечной аномалии (0,02), которое более чем в 3 раза превышает оптимум для незагрязненной растительности суши. Здесь проходит основная дорога, ведущая в город, которая также является источником Pb.

Таблица 22. Показатели экологического состояния ассимилирующих органов древесных растений в различных функциональных зонах Эрдэнэта

Ф-ная зона	Показатель					
	Fe/Mn		Pb/Mn		Cu/Zn	
	среднее	min-max	среднее	min-max	среднее	min-max
Листья тополя						
B	2,0	1,53-2,43	0,0057	0,003-0,008	0,12	0,1-0,14
I	3,4	0,58-8,87	0,0065	0,002-0,02	0,19	0,11-0,44
Sm	2,8	1,25-5,97	0,0049	0,002-0,007	0,20	0,06-0,4
Ss	2,4	1,36-4,6	0,0042	0,003-0,06	0,11	0,07-0,17
Хвоя лиственницы сибирской						
B	1,3	1-1,61	0,0020	0,002-0,003	0,58	0,44-0,92
I	3,4	0,68-6,79	0,0075	0,002-0,016	1,42	1,13-1,76
Sm	11,7	4,14-21,5	0,0196	0,007-0,04	0,48	0,26-0,7
Ss	11,1	1,83-26,3	0,0236	0,003-0,066	0,51	0,34-0,65

Примечание: B – фоновые территории; функциональные зоны горнопромышленного центра: I – промышленная, Sm – селитебная с многоэтажной застройкой, Ss – селитебная с одноэтажной (юрточная).

Превышение критического уровня (10 мг/кг), установленного для культурных растений (Рэуце, Кырстя, 1986), не выявлено ни в одной из проб. Анализ содержания Pb в ассимилирующих органах древесной растительности в различных функциональных зонах показал, что наибольшее техногенное воздействие испытывает хвоя лиственницы, в которой средние концентрации составляют 0,25-0,81 мг/кг, что значительно превышает содержания (0,002-0,006 мг/кг), при которых может отмечаться дефицит Pb (Ильин, Сысо, 2001; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989). Точечные максимумы достигают 1,2 мг/кг, что не превышает максимально допустимые концентрации (Сибиркина, 2014). Листья тополя характеризуются значительно меньшей вариабельностью отношения Pb/Mn – от 0,34 до 0,41 мг/кг, с точечными максимумами до 1,4 в промышленной зоне у северо-восточного края ТЭЦ, использующей уголь из разреза Баганур с содержанием Pb, превышающим кларки для угля более чем в 6 раз (Юдович, Кетрис, 2006).

Отношение Cu/Zn. Разброс средних значений Cu/Zn для ассимилирующих органов тополя составляет от 0,11 до 0,2, что ниже оптимального значения для незагрязненной растительности суши (Елпатьевский, Аржанова, 1990). В точечной аномалии, расположенной в непосредственной близости от ГОК «Эрдэнэт», отношение достигает 0,44, что в 1,6 раз превышает оптимум. Хвоя лиственницы сибирской характеризуется совершенно иными значениями Cu/Zn. Во всех функциональных зонах превышено оптимальное значение, так, наименьшее среднее Cu/Zn=0,48 зафиксировано в селитебной многоэтажной застройке, наибольшее 1,42 – в промышленной, что в 1,7 и 5,3 раза соответственно выше нормы. Это связано с тем, что при техногенной нагрузке ассимилирующие органы хвойных пород в меньшей степени, чем лиственных накапливают Zn (Автухович, 1999). Корреляционный анализ не выявил какой-либо связи в рас-

пределение этих элементов в ассимилирующих органах лиственницы сибирской и тополя, так как при длинах выборок n = 20 и 29 полученные коэффициенты r, равные 0,4 и 0,28 соответственно, являются не значимыми.

Критическое значение для Cu (20 мг/кг сухого вещества) превышено только в нескольких точках вблизи ТЭЦ как в хвое лиственницы, так и листьях тополя. Максимальные содержания достигают 30 и 32 мг/кг соответственно. Источником являются выбросы предприятия, так как содержание Cu в углях (96 мг/кг) более чем в 6 раз превышает глобальный кларк для углей (Юдович, Кетрис, 2006). С ростом антропогенной нагрузки в ассимилирующих органах деревьев содержание Cu также увеличивается от 5,5-7,1 мг/кг в фоновых условиях до 13-19 в промышленной зоне.

Фитотоксичная концентрация Zn (300 мг/кг) не превышена ни в одной из отобранных проб. Тополь, по сравнению с лиственницей, гораздо более активно накапливает этот элемент: средние значения варьируют от 63,5 до 77,4 мг/кг, а у хвои – 9,2-13,6. Локальный максимум 140 мг/кг сухого вещества в листьях тополя приурочен к промышленной зоне, для лиственницы 22 мг/кг – к селитебной с одноэтажной застройкой. Аналогичные результаты, свидетельствующие о видовой селективности к более активному накоплению Zn в лиственных породах деревьев по сравнению с хвойными, были получены ранее (Автухович, 1999; Ежов, 2011; Есенжолова, Панин, 2012; Кулагин, Шагиева, 2005).

Выводы

1. Наибольшая степень техногенной геохимической трансформации поверхностного слоя почв выявлена на 22% территории промышленной и селитебной с многоэтажной застройкой зон Закаменска, что обусловлено отсутствием контроля за размещением отходов ДВМК, должных рекультивационных работ и использованием материала хвостохранилищ при создании инфраструктуры города. В Эрдэнэте значения $Z_c > 128$ отмечены на площади менее 1%, относящейся к ГОКу и предприятию «Эрдмин», а для более 50% площади горнопромышленного центра уровень нарушенности определен как очень низкий ($Z_c < 8$).

2. 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 1,0. В Эрдэнэте ситуация совершенно иная: концентрации Zn, Cr, Sr, Pb, Co, Ni, Cd, Sn не превышают региональных нормативов, значения 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. Относительно международных санитарно-гигиенических нормативов в зоне влияния ДВМК и ГОК «Эрдэнэт» превышен допустимый уровень для Cd, Cu, Mo, Pb и Cu, Mo, соответственно. В промышленной зоне Эрдэнэт выявлены превышения Cu в 2,4 раза уровня, требующего экстренного вмешательства

для снижения негативного воздействия на почвенный покров.

3. Экологическая ситуация в горнопромышленных центрах обусловлена высокой степенью полиэлементного загрязнения почвенного покрова. Максимальные значения *ИПЗ* приурочены к аварийному хвостохранилищу в Закаменске и промплощадке в Эрдэнэте, они в 14 и 16 раз соответственно превышают чрезвычайно опасный уровень, равный 128. Несмотря на то, что ДВМК уже более 15 лет назад был закрыт, в результате непродуманного размещения хвостов и отсутствия должного контроля сформировалась обширная зона чрезвычайной экологической опасности (*ИПЗ* > 128), занимающая около половины площади горнопромышленного центра, в которой в последнее десятилетие наблюдается ухудшение геохимического состояния почв. В пределах Эрдэнэта только на 14% площади значения *ИПЗ* превышают 128, причем большая часть этой территории занята хвостохранилищем.

4. 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, включающая W, Pb, Bi, Cd, Mo, во всех органах хвойных и лиственных растений. В результате активных процессов физического и химического выветривания хвостохранилищ и техногенных месторождений установлено две аномалии: на севере Закаменска, фиксируемая в ассимилирующих органах; 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 *Lárix sibírica*, сформированной в непосредственной близости от ТЭЦ.

5. Резкое увеличение соотношения Fe/Mn в древесных растениях горнопромышленных центров до 5 и более в промышленной и селитебной зонах по сравнению с 0,02-3.4 в фоновых условиях свидетельствует о нарушении фотосинтеза растений под влиянием техногенеза. 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. Дисбаланс в обеспечении процессов синтеза ферментов из-за избытка Zn и дефицита Cu испытывают ассимилирующие и многолетние органы *Lárix sibírica Ledeb.* и *Bétula platyphýlla Sukaczev* во всех функциональных зонах исследуемых горнопромышленных центров. Органы лиственных пород (береза и тополь) в целом не испытывают значительного техногенного пресса, 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.

6. Все элементы независимо от видовой специализации растений имеют акропетальный характер распределения, их содержание в золе многолетних органов значительно превышает концентрации в золе ассимилирующих ($Ак_{березы,\ лиственницы}$=0,02-0,89). Базипетальный свойстве-

нен только для Mn в *Lárix sibírica Ledeb.* ($Ак_{листв.}$=1,6) и Sr, Ba и Ni – *Bétula platyphýlla Sukaczev* ($Ак_{березы}$=1,1-1,7). В зоне влияния ДВМК произошло изменение онтогенетической специализации древесных растений: коэффициент акропетальности 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 и является показателем того, что растения испытывают высокий уровень экологического стресса.

7. Для всесторонней эколого-геохимической оценки горнопромышленных центров рекомендуется использовать 3 показателя полиэлементного загрязнения – Z_c , *ИПЗ* и Z_v. Первый дает представление о степени техногенной трансформации почв под антропогенным воздействием, второй – об экологической опасности загрязнения почв в условиях повышенного геохимического фона, третий – о накоплении поллютантов и рассеяния эссенциальных элементов в органах древесной растительности. Сопоставление значений Z_c и *ИПЗ* в почвах горнопромышленных центров показало, что *ИПЗ* имеет более контрастное распределение и позволяет выявить участки с высоким содержанием наиболее токсичных элементов I класса опасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Природными особенностями горнопромышленных центров Закаменска и Эрдэнэта являются повышенные относительно глобальных кларков содержания в почвах W, Mo, Bi, Sb и Mo, Sb, Sr соответственно. В фоновых условиях в районе ГОК «Эрдэнэт» проявляются также петрохимические особенности морфоструктур – приуроченность к As геохимической провинции.

2. Техногенная трансформация горнопромышленных центров проявляется в смене направленности и интенсивности процессов рельефообразования, изменении баланса эрозионно-аккумулятивных процессов, а также в вовлечении в миграционные потоки больших количеств поступающих в ландшафты ТММ. Это ведет к многократному увеличению концентраций ТММ в поверхностных слоях почв. В обоих горнопромышленных центрах наиболее техногенно-нарушенными (с 5-24-кратным превышением фоновых значений ТММ) являются почвы промышленной зоны: в районе ДВМК накапливаются Bi, W, Cd, Be, Pb, Mo, Sb, а в районе ГОК «Эрдэнэт» – Mo, Cu. Наименьшая трансформация (EF_l 2-4) выявлена в природно-рекреационной зоне Закаменска и в районе распространения пастбищ в Эрдэнэта.

3. Разработка W-Mo и Cu-Mo месторождений привела к формированию парагенетических ассоциаций элементов-загрязнителей, набор и пространственная дифференциация которых в обоих горнопромышленных центрах связана преимущественно с функциональным назначением территорий (Cd, Cu, Zn, As, Mo, Pb, Sb) и физико-химическими свойствами почв (Co, V, Cr, Ni, Sr). В зоне влияния ДВМК они образуют высококонтрастные техногенные аномалии Zn–Cd–Cu–W–Bi–Sn и As–Sb–Pb–Mo и ГОК «Эрдэнэт» – Cu–Sb–As–Mo–Bi–Cd в хвостохранилищах, что обусловлено петрохимическими особенностями рудных тел и вмещающих пород. В Закаменске влияние комбината нивелирует воздействие остальных антропогенных источников, в отличие от него в Эрдэнэте в юрточной зоне и у северной границы ТЭЦ обнаружена аномалия Zn–Pb–Ba-Sn, связанная с использованием бурого угля, обогащенного относительно глобальных кларков As, Sn, Zn, Pb, Sb, Cd, Bi.

4. Геохимическая структура почв горнопромышленных центров обусловлена выпадением ТММ из атмосферы, поступлением из хвостохранилищ путем водной и воздушной миграции и частичным закреплением на латеральных и радиальных барьерах. При техногенном воздействии в почвах подчиненных ландшафтов Закаменска в десятки и сотни раз увеличивается концентрация халькофильных элементов W, Mo, Bi, Sb, Pb, Cd и неоднородность распределения в катенах. В почвах Эрдэнэта аномально высокие концентрации имеют Mo и Cu из-за петрохимических особенностей почвообразующих пород Селенгинского комплекса.

5. Разрушение хвостохранилищ приводит к формированию природно-техногенного сорбционно-седиментационного латерального геохимического барьера. В зоне влияния ДВМК

это проявляется в опесчанивании почвенного профиля и накоплении W, Bi, Pb, Cu, Ni, Cr, а в районе ГОК «Эрдэнэт» – в увеличении содержания ила и накоплении Cu, Mo. Тип латеральной дифференциации этих элементов в почвенных катенах изменяется с верхне- и внеаккумулятивного в фоновых условиях на нижне-аккумулятивный в пределах горнопромышленного центра. Элементы осаждаются также на хемосорбционном (V, Co, Ba), глеевом (Mo, Sb) и органоминеральном (Sn) латеральных барьерах. В Эрдэнэте выявлены хемосорбционный (V, As, Cr, Ni) и щелочной барьеры (Sr, W), а дифференциация Zn, Cd, Pb, Bi и Sb зависит от литолого-геохимической неоднородности почвообразующих пород, а не от изменения физико-химических свойств почв.

6. Повышенное содержание в почвах и атмосфере анионогенных элементов W и Mo в зоне влияния горно-обогатительных комбинатов не привело к смене биогеохимической специализации 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 *Lárix sibírica Ledeb*. поступающие ТММ, обусловливает более высокие EF_l, чем у лиственных пород, однако перечень приоритетных загрязнителей близок, что свидетельствует о слабой видовой избирательности фолиарного поглощения древесными растениями. Все элементы, за исключением Mn в *Lárix sibírica Ledeb*. и Sr, Ba, Ni в *Bétula platyphýlla Sukaczev*, 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. Таким образом, в рассматриваемых горнопромышленных центрах наиболее информативным биоиндикатором являются ассимилирующие органы *Lárix sibírica Ledeb*.

7. Несмотря сходство гидротермальных месторождений и применение одинаковых технологий при их разработке ландшафты Закаменска отличаются значительно более высоким уровнем полиэлементного загрязнения почвенного покрова – около половины площади горнопромышленного центра, промышленная и селитебная с многоэтажной застройкой зоны, характеризуется чрезвычайной опасной экологической ситуацией. В элементном плане опасность в обоих центрах относительно международных нормативов представляют Cu, Mo, а в зоне влияния ДВМК – еще также Cd и Pb. Различия вызваны источниками ТММ: в Эрдэнэте загрязнителями являются рудные элементы, в Закаменске – рудные и примеси, содержащиеся в отходах разработанных пород Первомайского штокверка, Инкурского и Холтосонского месторождений, а также сульфидных сливах обогатительной фабрики.

8. Оценка эколого-геохимического состояния почвенного покрова показала необходи-

мость проведения в обоих горнопромышленных центрах рекультивации существующих и формирующихся хвостохранилищ и техногенных месторождений путем их изоляции с помощью вяжущих веществ (битумной эмульсии, жидкого стекла, смол), препятствующих развеиванию и вымыванию загрязнителей, или фиторемедиации, снижающей дефляцию и делювиальный смыв материала. Последний способ также применим и на загрязненных почвах и позволяет достаточно эффективно снижать содержание опасных ТММ.

9. Диагностика экологического состояния древесных растений в горнопромышленных центрах показала наличие чрезвычайно высокого полиэлементного загрязнения в Закаменске и его отсутствие в Эрдэнэте. В первом выявлена техногенная аномалия на севере и в центре с повышенными концентрациями W, Pb, Bi, Cd, Mo; во втором – локальная аномалия в непосредственной близости от ТЭЦ. По отношениям Fe/Mn и Pb/Mn установлено, что наибольший техногенный пресс испытываются хвойные растения в промышленной зоне Закаменска.

10. 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, необходимо использовать комплекс геохимических показателей, характеризующих: степень техногенной геохимической трансформации, определяемую по значениям суммарного показателя загрязнения Z_c; уровень загрязнения ТММ с учетом токсичности элементов, суммируемый интегральным показателем загрязнения *ИПЗ*; нарушение микроэлементного состава органов древесной растительности, отражаемое коэффициентом биогеохимической трансформации Z_v; 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 городских.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин В.Н. Техногенное окисление сульфидов Красногвардейского месторождения на Урале // Материалы по минералогии месторождений Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 63–69.

2. Авессаломова И.А. Биогеохимия ландшафтов: Учебное пособие. Москва: Географический факультет МГУ, 2007. 162 с.

3. Авессаломова И.А. Ландшафтно-функциональные карты при изучении геохимических аномалий в городе // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 1986. Т. 5. С. 88–94.

4. Авессаломова И.А. Функционирование и динамика горных ландшафтов // География, общество, окружающая среда. Том II. Функционирование и современное состояние ландшафтов. Москва: Городец, 2004. С. 154–170.

5. Автухович И.Е. Влияние микроэлементов на устойчивость к антропогенным нагрузкам лиственницы сибирской и каштана конского: автореф. ... канд.биол.наук. Москва: Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 1999. 26 с.

6. Айвазян А.Д. Геохимическая специализация флоры Алтая: автореф. ... канд.геогр.наук. , 1974. 21 с.

7. Айвазян А.Д., Касимов Н.С. О геохимической специализации растений на примере Мугоджар // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 1979. Т. 3. С. 42–47.

8. Алексеенко В.А. Эколого-геохимические изменения в биосфере. Развитие, оценка. Москва: Логос, 2006. 520 с.

9. Альмухамедов А.И., Гордиенко И.В., Кузьмин М.И. Джидинская зона – фрагмент Палеоазиатского океана // Геотектоника. 1996. № 4. С. 25–42.

10. Анисимова Л.И. и др. Заключение о гидрологических условиях в районе города Эрдэнэт в МНР. Москва: ПНИИИС, Госстрой СССР, 1975. 42 с.

11. АОЗТ «Механобр Инжиринг». Оценка существующего состояния хвостохранилища СП «Эрдэнэт». Обеспечение укладки хвостов выше отметки 1290 м в условиях увеличения производительности обогатительной фабрики комбиината СП «Эрдэнэт» более 25 млн. т руды в год. Пояснительная записка (Отчет). , 2001. 200 с.

12. Банникова И.А. Лесостепь внутренней Азии: структура и функции. Москва: РСХА, 2003. 286 с.

13. Башкин В.Н., Касимов Н.С. Биогеохимия. Москва: Научный мир, 2004. 648 с.

14. Безуглова О.С., Орлов Д.С. Биогеохимия. Ростов-на-Дону: «Феникс», 2000. 320 с.

15. Белан Л.Н. Медико-биологические особенности горнорудных районов // Медико-биологические особенности горнорудных районов. 2006. № 5. С. 112–117.

16. Белозерцева И.А. и др. Почвенно-экологическое районирование трансграничной территории России и Монголии // Современные проблемы науки и образования. 2005. Т. 2. № 2.

17. Белозерцева И.А. и др. Почвы бассейна озера Байкал и их картографирование на территории России и Монголии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2014. Т. 5. С. 115–120.

18. Береснева И.А. Климаты аридной зоны Азии. Москва: Наука, 2006. 288 с.

19. Берзина А.П. и др. Базиты полихронного магматического центра с Cu-Mo-порфировым месторождением Эрдэнэтуин-Обо (Северная Монголия): петрогеохимия, 40Ar/39Ar геохронология, геодинамическая позиция, связь с рудообразованием // Геология и геофизика СО РАН. 2009. Т. 50. № 10. С. 1077–1094.

20. Берзина А.П., Борисенко А.С. Медно-молибден-порфировое оруденение и мантийный плюмы // Доклады РАН. 2008. Т. 422. № 5. С. 655–659.

21. Берзина А.П., Сотников В.И. Особенности формирования Cu-Mo-порфирового магматического центра Эрдэнэтуин-Обо (Северная Монголия) в области влияния пермотриасового плюма // Геология и геофизика СО РАН. 2007. Т. 48. № 2. С. 185–203.

22. Беспалов Н.Д. Почвы Монгольской Народной Республики. Москва: Изд-во АН СССР, 1951. 319 с.

23. Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. Москва: Недра, 1976. 248 с.

24. Беус А.А., Григорян С.В. Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. Москва: Недра, 1975. 280 с.

25. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. Санкт-Петербург: Изд-во СПб ун-та, 2011. 367 с.

26. Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И. Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 2012. Т. 1. С. 23–28.

27. Большаков В.А. и др. Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1999. 32 с.

28. Борисенко А.С. Анализ динамики накопления металлов в почвах урбанизированной территории // Эколого-геохимический анализ техногенного загрязнения. Москва: ИМГРЭ, 1992. С. 104–115.

29. Борисенко А.С., Несвижская Н.И., Сорокина Е.П. Ландшафтно-геохимические особенности техногенных почвенных аномалий, связанных с промышленными выбросами // Методы изучения техногенных геохимических аномалий. Москва: ИМГРЭ, 1974. С. 58–65.

30. Бортникова С.А., Гаськова О.Л., Айриянц А.А. Техногенные озера: формирование, развитие и влияние на окружающую среду. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал ГЕО, 2003. 120 с.

31. Бортникова С.Б. Геохимия тяжелых металлов в техногенных системах: Вопросы формирования и взаимодействия с компонентами экосферы: дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. Новосибирск: Институт геологии СО РАН, 2001. 315 с.

32. Будкина С.В. Агроэкологическая оценка фракционного состава подвижных форм тяжёлых металлов дерново-подзолистой супесчаной почвы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва: МСХА имени К.А. Тимерязева, 2011. 27 с.

33. Булгатов А.Н., Климук В.С. Основные черты строения Джидинской зоны каледонид Бурятии // Геотектоника. 1998. № 1. С. 45–55.

34. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Суточная температура воздуха и количество осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR) (свидетельство №2014620942). Москва: ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский интитут гидрометеорологической информации - Мировой центра данных», 2014.

35. Буренков Э.К. и др. Задачи и методы разномасштабного эколого-геохимического картирования // Эколого-геохимические исследования в районах интенсивного техногенного воздействия. Москва: ИМГРЭ, 1990. С. 4–15.

36. Буренков Э.К. Комплексная эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения окружающей природной среды. Москва: Прима-пресс, 1997. 72 с.

37. Буренков Э.К. Эколого-геохимическая оценка соотояния окружающей среды г. Саранска / под ред. Э.К. Буренков и др. Москва: ИМГРЭ, 1993. 115 с.

38. Буренков Э.К., Янин Е.П. Эколого-геохимические исследования в ИМГРЭ - прошлое, настоящее, будущее // Прикладная геохимия. Выпуск 2. Экологическая геохимия / под ред. Э.К. Буренков. Москва: ИМГРЭ, 2001. С. 5–24.

39. Бямба Ч. Оценка влияния горного производства на экологическую обстановку в условиях разработки месторождений «Эрдэнэтийн-Овоо». Диссер. на соиск. уч. ст. канд. тех. наук. Москва: Московский государственный горный университет, 2007. 89 с.

40. Васильев А.А., Чащин А.Н. Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения. Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХИ, 2011. 197 с.

41. Ваул Я. и др. Отчет о геологической съемке масштаба 1:100 000 района Эрдэнитуин-Обо, проведенной чехословацкой экспедицией. Москва: ПНИИИС, ГГФ-МНР, 1968.

42. Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов и периодическая система Д.И. Менделеева // Труды биогеохимической лаборатории АН СССР. 1935. Т. 3. С. 5–

30.

43. Власов Д.В. Геохимия тяжелых металлов и металлоидов в ландшафтах восточного округа Москвы: дисс. ... канд.геогр.наук. Москва: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2015. 160 с.

44. Власюк П.А. Биологические элементы в жизнедеятельности растений. Киев: Наукова думка, 1969. 516 с.

45. Водяницкий Ю.Н. Анализ кривых распределения соединений железа по профилю почвы // Почвоведение. 1991. № 5. С. 29–36.

46. Водяницкий Ю.Н. Изучение тяжелых металлов в почвах. Москва: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2005. 111 с.

47. Водяницкий Ю.Н. Роль соединений железа в закреплении тяжелых металлов и металлоидов в почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2010. № 5. С. 558–572.

48. Водяницкий Ю.Н. Тяжелые и сверхтяжелые металлы и металлоиды в загрязненных почвах. Москва: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева Россельхозакадемии, 2009. 184 с.

49. Гаврилова С.П., Максимюк И.Е., Оролмаа Д. Молибден-модно-порфировое месторождение Эрдэнэт (Монголия). Москва: ИМГРЭ, 2010. 270 с.

50. Гедгафова Ф.В., Улигова Т.С. Тяжелые металлы в природных и техногенных экосистемах центрального Кавказа // Экология. 2007. № 4. С. 317–320.

51. Геннадиев А.Н., Жидкин А.П. Типизация склоновых сопряжений почв по кличественным проявлениям смыва-намыва вещества // Почвоведение. 2012. Т. 1. С. 1–11.

52. Геохимические исследования городских агломераций: Сб. науч. ст. / под ред. Э.К. Буренков, В.В. Иванов. Москва: ИМГРЭ, 1998. 166 с.

53. Геохимические методы в экологических исследованиях : Сб. науч. ст. / под ред. Э.К. Буренков. Москва: ИМГРЭ, 1994. 155 с.

54. Герасимов И.П., Лавренко Е.М. Основные черты природы Монгольской Народной Республики // Известия АН СССР. Серия географическая. 1952. Т. 1. С. 27–48.

55. Герасимов И.П., Ногина Н.А. Почвенный покров и почвы Монголии. Москва: Наука, 1984. 194 с.

56. Гиниятуллин Р.Х. и др. Содержание некоторых металлов в надземных органах березы повислой в условиях промышленного загрязнения // Биологическая рекультивация нарушенных земель материалы Международного совещания. Екатеринбург, 26–29 августа 1996. 1997.

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

58. Глазовская М.А. Геохимия природных и техногенных ландшафтов. Москва:

Географический факультет МГУ, 2007. 350 с.

59. ГН 2.1.7.2041-06. «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве», утвержден главным гос. санитарным врачом РФ Г.Г. Онищенко. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2006.

60. ГН 2.1.7.2042-06. «Ориентировочно-допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве», утвержден главным государственным санитарным врачом РФ Г.Г. Онищенко. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2006.

61. Головин А.А. и др. Оценка ущерба окружающей среде от загрязнения токсичными металлами. Москва: ИМГРЭ, 2000. 134 с.

62. Гордиенко И.В. и др. Возраст и условия формирования коллизионных гранитоидов Джидинской зоны Центрально-азиатского складчатого пояса, юго-западное Забайкалье // Петрология. 2012. Т. 20. № 1. С. 45–65.

63. Гордиенко И.В. и др. Джидинская островодужная система Палеоазиатского океана: строение и основные этапы геодинамической эволюции в венде-палеозое // Геология и геофизика СО РАН. 2007. Т. 48. № 1. С. 120–140.

64. Горная лесостепь Восточного Хангая (МНР) / под ред. Е.М. Лавренко, И.А. Банникова. Москва: Наука, 1983. 190 с.

65. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. Москва: , 2008.

66. ГОСТ 27784-88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1989.

67. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.

68. Гунин П.Д. и др. Экосистемы бассейна Селенги. Москва: Наука, 2005. 359 с.

69. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. Москва: Мысль, 1983. 272 с.

70. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. Москва: Издательский центр «Академия», 2003. 400 с.

71. Добровольский В.В., Урусевская И.С. География почв: Учебник. Москва: Изд-во МГУ, Изд-во «КолосС», 2004. Вып. 2-е изд., . 460 с.

72. Доржготов Д. Основные черты географии почв северной Монголии и характеристика степных почв: автореф. ... канд.геогр.наук. Москва: , 1973. 24 с.

73. Доржготов Д., Батхишиг О. Почвы. Почвенно-географическое районирование

Монголии // Национальный Атлас Монголии. , 2009. С. 120–122.

74. Дуров Н.М. и др. Оценка и прогнозирование ветрового разноса загрязняющих веществ в зоне влияния металлургических предприятия // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2009. Т. 3. С. 57–61.

75. Ежов А.Ю. Тяжелые металлв в растительном покрове северо-запада Кольского полуострова // Фундаментальная наука вузам. Географические науки. 2011. № 1. С. 221–226.

76. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. Москва: Наука, 1993. 253 с.

77. Елпатьевский П.В. Гидрохимические потоки, продуцируемые сульфидизированными техногенными литоаккумуляциями // География и природные ресурсы. 2003. № 2. С. 26–33.

78. Елпатьевский П.В., Аржанова В.С. Геохимия ландшафтов и техногенез. Москва: Наука, 1990. 196 с.

79. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: УрГУ, 1991. 256 с.

80. Есенжолова А.Ж., Панин М.С. Биоиндикационный потенциал листьев древесных и кустарниковых растений г. Темиртау // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3 (19). С. 160–168.

81. Зиновьева И.Г. и др. Вторая очередь мероприятий по ликвидации экологических последствий деятельности Джидинского вольфрамо-молибденового комбината в Закаменском районе Республики Бурятия: Предпроектные исследования. Научно-технический отчет. Чита: ООО «Гидроспецстрой», 2011. 213 с.

82. Зонн С.В., П.И. К. Основные положения и выводы из почвенно-геоботанических исследований в бассейне реки Селенги. Отчет о работе Бурят-Монгольской экспедиции. Рукопись: , 1935.

83. Иванов В.В. и др. Научные основы и направления экологической геохимии в XXI веке // Прикладная геохимия. Выпуск 2. Экологическая геохимия2 / под ред. Э.К. Буренков. Москва: ИМГРЭ, 2001. С. 25–50.

84. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник в 6 кн. Кн. 1: s-элементы / под ред. Э.К. Буренков. Москва: Недра, 1994. 304 с.

85. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник в 6 кн. Кн. 4: Главные d-элементы. Москва: Экология, 1995. 416 с.

86. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.

87. Иметхенов А.Б. и др. Воздействие техногенных загрязнений Джидинского

вольфрамо-молибденового комбината на здоровье детей г. Закаменска (Республика Бурятия) // Вестник Бурятского государственного университета. 2015. Т. 4. С. 229–236.

88. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Москва: Мир, 1989. 439 с.

89. Кавеленова Л.М., Здетоветский А.Г., Огневенко А.Я. К специфике содержания зольных веществ в листьях древесных растений в городской среде в условиях лесостепи (на примере Самары) // Химия растительного сырья. 2001. № 3. С. 85–90.

90. Казанцев И.В. Экологическая оценка влияния железнодорожного транспорта на содержание тяжелых металлов в почвах и растениях полосы отвода: автореф. … канд. биол. наук. Самара: , 2008. 18 с.

91. Карамышева З.В., Банзрагч Д. О некоторых ботанико-географических закономерностях Хангая в связи с его районированием // Растительный и животный мир Монголии. Ленинград: Наука, 1977. С. 7–26.

92. Карамышева З.В., Банзрагч Д. Растительность хребта Хан-Хухийн-Ула и южной части Убсу- нурской впадины // Структура и динамика основных экосистем МНР. Ленинград: Наука, 1976. С. 99–124.

93. Карпель А. и др. Отчет о почвенно-мелиоративных условиях территории II очереди строительства г. Эрдэнэт в Монгольской Народной Республике. Том I. Москва: ПНИИИС, Техархив, 1975. 20 с.

94. Карташева Г.Г. Химический состав деревьев и кустарников, произрастающих на уступах угольного разреза // Растения и промышленная среда : сб. науч. тр. / под ред. Т.С. Чибрик. Свердловск: УрГУ, 1984. С. 72–77.

95. Касимов Н.С. и др. Биогеохимическая специализация растений Центральной Монголии // География и природные ресурсы. 1989. № 2. С. 112–119.

96. Касимов Н.С. и др. Геоинформационное ландшафтно-геохимическое картографирование городских территорий (на примере ВАО Москвы). 1. Картографическое обеспечение // Геоинформатика. 2012b. Т. 4. С. 37–45.

97. Касимов Н.С. и др. Проблемы экогеохимии крупных городов // Охрана и разведка недр. 2012a. № 7. С. 8–13.

98. Касимов Н.С. и др. Эколого-геохимическое состояние почв г. Улан-Батор (Монголия) // Почвоведение. 2011. Т. 7. С. 8–13.

99. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. Москва: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.

100. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 2015. № 2. С. 7–17.

101. Касимов Н.С., Евдокимова А.К., Казанцева Т.И. Элементный состав растений

основных экосистем Заалтайской Гоби // Растительные ресурсы. 1989. Т. 25. № 2. С. 284–294.

102. Касимов Н.С., Никифорова Е.М. Геохимия городов и городских ландшафтов // Экология города / под ред. А.С. Курбатова, В.Н. Башкин, Н.С. Касимов. Москва: Научный мир, 2004. С. 234–268.

103. Касимов Н.С., Самонова О.А. Катенарная ландшафтно-геохимическая дифференциация // География, общество, окружающая среда. Том II. Функционирование и современное состояние ландшафтов. Москва: Городец, 2004. С. 479–489.

104. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.

105. Ковалевский А.Л. Основные закономерности формирования химического состава растений // Труды Бурятского института естественных наук. Улан-Удэ: Бурятское книжное издательсво Улан-Удэ, 1969. С. 195–214.

106. Ковальский В.В. Геохимическая среда, микроэлементы, реакции организмов // Труды биохимической лаборатории т. 22. Проблемы геохимической экологии. Москва: Наука, 1991. С. 5–23.

107. Ковда В.А. Основы учения о почвах. Том 1. Москва: Наука, 1973. 448 с.

108. Коминек Э. и др. Отчет чехословацкой геологической экспедиции в МНР о поисково-разведочных работан на СХ участке молибденово-медных руд Эрдэнитуин-Обо. Москва: ПНИИИС, ГГФ-МНР, 1969.

109. Копцик Г.Н. и др. Реакция лесных экосистем на сокращение атмосферных промышленных выбросов в Кольской Субарктике // Журнал общей биологии. 2016. Т. 77. № 2. С. 147–164.

110. Копцик Г.Н. Проблемы и перспективы фиторемедиации загрязненных тяжелыми металлами почв (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. Т. 9. С. 1–10.

111. Копылова Л.В. Аккумуляция железа и марганца в листьях древесных растений в техногенных районах Забайкальского края // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 1 (3). С. 709–712.

112. Копылова Л.В. Особенности поглощения некоторых тяжелых металлов древесными растениями в условиях городской среды // Вестник ИрГСХА: науч.-практ. журн. 2011. № 44 (3). С. 91–99.

113. Копылова Л.В. Оценка уровня загрязнения почв тяжёлыми металлами и интенсивность поглощения их древесными растениями // Ученые записки ЗабГГПУ. 2002. № 1 (42). С. 70–75.

114. Копылова Л.В., Якимова Е.П. Особенности накопления металлов древесными растениями в условиях городской среды // Ученые записки Забайкальского гос. ун-та. Серия Естественные науки. 2013. № 1 (48). С. 74–81.

115. Королюк А.Ю. Растительность // Степи Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. С. 45–94.

116. Корсунов В.М., Цыбжитов Ц.Х. Почвенный покров бассейна оз. Байкал // Почвенные ресурсы Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1989. С. 4–12.

117. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В. Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // Почвоведение. 2015. № 5. С. 536–553.

118. Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Самонова О.А. Регрессионные модели поведения тяжелых металлов в почвах Смоленско-Московской возвышенности // Почвоведение. 2002. № 8. С. 954–966.

119. Кошелева Н.Е., Макарова М.Г., Новикова О.В. Тяжелые металлы в листьях древесных пород городских ландшафтов // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 2005. Т. 3. С. 74–81.

120. Кривцов А.И. и др. Меднопорфировые месторождения. Москва: ЦИНГРИ, 2001. 232 с.

121. Кулагин А.., Шагиева Ю.А. Древесные растения и биологическая консервация промышленных загрязнителей. Москва: Наука, 2005. 190 с.

122. Куликов А.И. и др. Экологическое зонирование и статистические параметры экологически опасных зон города Закаменска (Республика Бурятия) // Вестниг ВСГУТУ. 2012. Т. 3. № 38. С. 71–76.

123. Лавренко Е.М., Карамышева З.В., Никулина Р.И. Степи Евразии. Ленинград: Наука, 1991. 144 с.

124. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.

125. Лянгузова И.В. Толерантность компонентов лесных экосистем Севера России к аэротехногенному загрязнению: автореф. ... докт.биол.наук. Санкт-Петербург: Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, 2010. 39 с.

126. Максимович С.В. Особенности почвообразования на Хангае и прилегающих территориях // Структура и динамика степных и пустыннх экосистем МНР. , 1974. С. 163–166.

127. Малюга Д.П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1963. 264 с.

128. Малютин Ю.А. и др. Геолого-геохимические особенности месторождения Эрдэнэтийн-Ово // Вестник Моск. ун-та. Серия 4. Геология. 2007. № 5. С. 32–39.

129. Махинова А.Ф. и др. Ландшафтно-геохимическое районирование бассейна р. Амур (Российская часть) // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 2. С. 76–89.

130. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами / под ред. Б.А. Ревич и др. Москва: ИМГРЭ, 1982. 112 с.

131. Министерство сельского хозяйства СССР. Классификация и диагностика почв СССР. Москва: Колос, 1977. 223 с.

132. Морозова И.А. Геохимические ландшафты и экологическая опасность // Прикладная геохимия. Выпуск 1. Геохимическое картирование. Москва: ИМГРЭ, 2000. С. 122–134.

133. Морозова И.А. Ландшафтно геохимические основы многоцелевого геохимического картирования // Прикладные аспекты геохимических исследований. Москва: ИМГРЭ, 1993. С. 9–17.

134. Моссаковский А.А., Томуртогоо О. Верхний палеозой Монголии. Труды совместной советско-монгольской научно-исследовательской геологической экспедиции. Выпуск 15. Москва: Наука, 1976. 126 с.

135. МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. : утвержден главным государственным санитарным врачом РФ, 1999.

136. Набойченко С.С., Цогтхангай Д., Доржпурэв М. Гидрометаллургическая активация халькозинового концентрата // Известия Вузов. Цветная металлургия. 1982. № 5. С. 18–21.

137. Никитин В.М., Оболенская А.В., Щеголев В.П. Химия древесины и целлюлозы. Москва: Изд-во «Лесная промышленность», 1978. 368 с.

138. Никифорова Е.М., Кошелева Н.Е. Динамика загрязнения городских почв свинцом (на примере Восточного округа Москвы) // Почвоведение. 2007. № 8. С. 984–997.

139. Новикова О.В. Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности городских ландшафтов (на примере гг. Москвы и Кито): дисс. ... канд.геогр.наук. , 2005. 164 с.

140. Новикова О.В., Кошелева Н.Е. Эколого-геохимическая оценка состояния древесной растительности г. Кито (Эквадор) // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География. 2007. № 6. С. 43–48.

141. Новоселов С.С. Исследование выбросов в атмосферу твердых продуктов сгорания мазута и разработка методов их сокращения. Дисс. ... канд.тех.наук. Москва: , 1983. 171 с.

142. Ногина Н.А. Почвенный покров основных природных зон Монголии / под ред. Н.А. Ногина, Л.П. Рубцова, О.И. Худяков. Москва: Наука, 1978. 275 с.

143. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. Москва: Наука, 1964. 312 с.

144. Ногина Н.А., Уфимцева К.А. Почвы Бурятской АССР и их агропроизводственная характеристика // Материалы Бурятского регионального совещания конференции по развитию производительных сил Восточной Сибири. Улан-Удэ: Бурятский комплексный научно-

исследовательский институт СО АН СССР, 1959.

145. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г. Геохимия техногенеза в районе разработки Сибайского медно-колчеданного месторождения // Записки горного института. 2013. Т. 203. С. 196–204.

146. Опекунова М.Г. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации: автореф. ... док.геогр.наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2013. 36 с.

147. Опекунова М.Г. и др. Воздействие природных и антропогенных факторов на элементный состав растений Башкирского Зауралья // Биосфера. 2015. Т. 7. № 2. С. 181–198.

148. Опекунова М.Г., Гизетдинова М.Ю. Использование лишайников в качестве биоиндикаторов загрязнения окружающей среды // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2014. Т. 1. С. 79–94.

149. ОСТ 41-08-212-04. Управление качеством аналитических работ. Нормы погрешности при определении химического состава минерального сырья и классификация методик лабораторного анализа по точности результатов. Москва: ФГУП «ВИМС», 2005.

150. Панкова Е.И. Каштановые почвы Восточно-Монгольской равнины и их краткая мелиоративная оценка // Почвенно-географические и ландшафтно-геохимические исследования. Москва: Изд-во МГУ, 1964. С. 158–181.

151. Пантелеев В.Г. и др. Состав и свойства золы и шлака ТЭС: справочное пособие / под ред. В.А. Мелентьев. Ленинград: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1985. 288 с.

152. Папов А.П. Реализация природоохранных мероприятий, связанных с закрытием Джидинского вольфрамово-молибденового комбината г. Закаменска; оценка экологической ситуации в прилегающей зоне бывшего ДВМК: Пояснительная записка. Улан-Удэ: ФГОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова», 2007. 259 с.

153. Перельман А.И. Геохимия. Москва: Высшая школа, 1989. 528 с.

154. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов. Москва: Астрея-2000, 1999. 610 с.

155. Пестряк И.В., Эрдэнэтуяа О. Совершенствование системы оборотного водоснабжения горно-обогатительного комбината // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 142–149.

156. Повилайтис М.М. Основные черты минералогии Джидинского молибдено-вольфрамового месторождения. Москва: Изд-во АН СССР, 1960. 167 с.

157. Полынов Б.Б. Избранные труды. Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1956. 751 с.

158. Почва, город, экология / под ред. Г.В. Добровольский. Москва: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.

159. Прасолов Л.И. Верхеононский район Забайкальской области. Предварительный отчет об организации и исполнении работ по исследованию почв Азиатской России. Санкт-Петербург: Изд-во Переселенческого управления, 1913.

160. Прасолов Л.И. Южное Забайкалье (почвенно-географический очерк). Ленинград: Изд-во АН СССР, 1927.

161. Прикладные аспекты геохимических исследований : Сб. науч. ст. / под ред. Э.К. Буренков. Москва: ИМГРЭ, 1993. 132 с.

162. Прохорова Н.В., Матвеев Н.М., Павловский В.А. Аккумуляция тяжелых металлов дикорастущими и культурными растениями в лесостепном и степном Поволжье. Самара: Изд-во Самарского ун-та, 1998. 131 с.

163. Прусаков В.М. и др. Оценка риска здоровью детского населения от воздействия техногенных песков вольфрамово-молибденового ГОКа // Методологические проблемы экологически обусловленных нарушений здоровья: Бюлл. ВСНЦ СО РАМН. Иркутск: Научный центр реконструктивной и восстановительной хирургии СО РАН, 2005. С. 55–60.

164. Ремезов Н.П., Погребняк П.С. Лесное почвоведение. Москва: Изд-во «Лесная промышленность», 1965. 322 с.

165. Ринькис Г.Я. Оптимизация минерального питания растений. Рига: Зинатне, 1972. 355 с.

166. Рэуце К., Кырстя С. Борьба с загрязнением почвы. Москва: Агропромиздат, 1986. 222 с.

167. Сабинин Д.А. Избранные труды по минеральному питанию растений. Москва: Наука, 1971. 512 с.

168. Сабинин Д.А. Физиологические основы питания растений. Москва: Изд-во АН СССР, 1955. 514 с.

169. Сает Ю.Е. и др. Геохимия окружающей среды. Москва: Недра, 1990. 335 с.

170. Сает Ю.Е., Башаркевич И.Л., Ревич Б.А. Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. Москва: ИМГРЭ, 1982. 66 с.

171. Сает Ю.Е., Онищенко Т.Л., Янин Е.П. Методические рекомендации по геохимическим исследованиям для оценки воздействия на окружающую среду проектируемых горнодобывающих предприятий. Москва: ИМГРЭ, 1986. 99 с.

172. Сает Ю.Е., Ревич Б.А. Эколого-геохимические подходы к разработке критериев нормативной оценки состояния городской среды // Известия АН СССР. Серия географическая1. 1988. Т. 4. С. 37–46.

173. Самонова О.А., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Ассоциации микроэлементов в

профиле дерново-подзолистых почв южной тайги // Вестник Моск. ун-та. Серия 17. Почвоведение1. 1998. № 2. С. 14–19.

174. Сауков А.А. Геохимия. Москва: Наука, 1975. 477 с.

175. Семенова О.Ф. Почвы Еравнинского аймака Бурят-Монгольской АССР. // Материалы по изучению производственных сил Бурят-Монгольской АССР. 1957. Т. 3. С. 565–604.

176. Сибиркина А.Р. Биогеохимическая оценка содержания тяжелых металлов в сосновых борах Семипалатинского Прииртышья. Омск: Челябинский государственный университет, 2014. 496 с.

177. Симонов В.А. и др. Условия формирования базальтовых комплексов Джидинской зоны Палеоазиатского океана // Геология и геофизика СО РАН. 2014. Т. 55. № 8. С. 929–940.

178. Синица И.В. Разработка и исследования параметров способа закрепления пылящих поверхностей хвостохранилищ: автореф. дис. … канд. техн. наук. Белгород: Белгородский государственный университет, 2008. 23 с.

179. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. Москва: Недра, 1976. Вып. 3-е, перер. 688 с.

180. Смирнов В.И. и др. Отчет о гидрологических изысканиях на реках Эрдэнэтийн, Гавелин, Зуна, Цаган-Чулуту и Хангал, выполненных за период с 01.07.1974 г. по 31.12.1975 г. Москва: ПНИИИС, Госстрой СССР, 1976. 102 с.

181. Смирнова О.К., Дампилова Б.В. Динамика форм нахождения свинца, цинка, меди и их биодоступность в лежалых хвостах обогащения сульфидно-вольфрамовых руд // Мат-лы III Всеросс. симпозиума «Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий». 2010.

182. Смирнова О.К., Плюснин А.М. Джидинский рудный район (проблемы состояния окружающей среды). Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 2013. 181 с.

183. Смирнова О.К., Ходанович П.Ю., Яценко Р.И. Тяжелые металлы в техногенных ландшафтах района Джидинского горно-обогатительного комбината // Труды II Всеросс. симп. “Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий” и VIII Всеросс. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана “Современное минералообразование”. 2006. С. 82–87.

184. Соколова Т.А., Соколов И.А. О горно-таежных почвах Восточного Забайкалья // О почвах Восточной Сибири. Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1963. С. 3–47.

185. Солнцева Н.П. Структура техногенных ландшафтно-геохимических систем при горнорудном типе промышленных воздействий // Методология и методика почвенных и ландшафтно-геохимических исследований / под ред. М.А. Глазовская. Москва: Изд-во Московского университета, 1977. С. 115–126.

186. СП 11-102-97. «Инженерно-экологические изыскания для строительства».

Критерии экологической оценки загрязнения почв в соответствии с «Neue Niederlandische Liste. Altlasten Spektrum 3/95». Москва: Департамент развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России, 1997.

187. Строганова М.Н. Почвы и почвенный покров мира: география, генезис и экология (Электронное издание). Москва: Факультет Почвоведения, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2008.

188. Тайсаев Т.Т., Ходанович П.Ю., Лбов А.В. и др. Экогеохимическое состояние ландшафтов Джидинского ВМКа // Вестник БГУ. Серия 3 География, геология. 1998. № 2. С. 145–153.

189. Тарабрин В.П. Устойчивость древесных растений в условиях промышленного загрязнения: автореф. ... докт.биол.наук. Киев: , 1974. 71 с.

190. Терехина Н.В. Методические указания к проведению фитогеохимических исследований. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2010. 26 с.

191. 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.

192. Тулохонов А.К. Бурятия. Улан-Удэ: Экос, 2011. 328 с.

193. Тулохонов А.К., Абидуева Т.И. Оценка экологического состояния территории г. Закаменск с целью определения зоны экологического неблагополоучия. Улан-Удэ: Ордена Ленина Сибирское отд. РАН, Байкальский институт природопользования, 2000. 50 с.

194. Убугунов Л.Л. и др. Почвы Бурятии: разнообразие, систематика и классификация // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2012. Т. 2. С. 45–52.

195. Убугунова В.И. и др. Аллювиальные почвы речных долин бассейна Селенги. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 1998. 254 с.

196. Удачин В.Н., Ершов В.В. Экспериментальное исследование миграции меди, цинка и свинца из промотходов Карабашской геотехнической системы // Промышленные и бытовые отходы. Проблемы и решения материалы конф. 1995. С. 135–142.

197. Усманов М.Л. Гипергенные преобразования отходов обогащениясульфидных руд // Уральский минералогический сборник. 1995. № 5. С. 135–142.

198. Уфимцев Г.Ф. Горные пояса континентов и симметрия рельефа Земли. Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1991. 168 с.

199. Уфимцева К.А. О горных таежных почвах Забайкалья // Почвоведение. 1963. Т. 3. С. 21–30.

200. Уфимцева К.А. Степные и лесостепные почвы Бурятской АССР. Москва: Изд-во

Академии наук СССР, 1960. 149 с.

201. Уфимцева К.А. Характеристика почвенных районов бассейна р. Селенги // Материалы по изучению производительных сил Бурят-Монгольской АССР. 1956. № 2. С. 275–293.

202. Уфимцева М.Д., Терехина Н.В. Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем Санкт-Петербурга. Санкт-Петербург: Наука, 2005. 339 с.

203. Физиология растительных организмов и роль металлов / под ред. Н.М. Чернавской. Москва: Издательство МГУ, 1988. 157 с.

204. Филиппова Н.А. Фазовые анализ руд и продуктов их переработки. Москва: Химия, 1975. 140 с.

205. Фортескью Д. Геохимия окружающей среды. Москва: Мир, 1985. 360 с.

206. Хайбрахманов Т.С., Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Опыт построения карты родов элементарных ландшафтов на основе ЦМР для территории г. Закаменска (Бурятия) // Опыт построения карты родов элементарных ландшафтов на основе ЦМР для территории г. Закаменска. 2015. С. 148–152.

207. Хамнаева Г.Г., Куликов А.И., Цыдыпов Б.З. О современном экологическом состоянии окружающей среды города Закаменска и сопредельной территории // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2013. Т. 3. № 32. С. 79–85.

208. Хасин Р.А. и др. Медно-Молибденовое месторождение Эрдэнэтуин-Обо в Северной Монголии // Геология рудных месторождений. 1977. № 7. С. 3–15.

209. Ходанович П.Ю. и др. Состояние природных сред и экосистем территории, прилегающей к промплощадкам Джидинского ГОКа // Закамна в XXI веке. Матер. науч.-практ. конф. 2002. С. 122–131.

210. Ходанович П.Ю. Лежалые отходы обогащения Джидинского вольфрамо-молибденового комбината как комплексные техногенные месторождения // Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплекса Республики Бурятии. 1999. С. 142–151.

211. Ходанович П.Ю., Смирнова О.К., Яценко Р.И. Экологические проблемы освоения сульфидсодержащих вольфрамовых месторождений в условиях таежно-мерзлотных ландшафтов расчлененного среднегорья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2002. № 12. С. 52–59.

212. Ходанович П.Ю., Яценко Р.И., Смирнова О.К. Техногенные пески Джидинского ГОКа как месторождения комплексных руд // Закамна в XXI веке. Матер. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2002. С. 61–67.

213. Хөрсний Чанар... Хөрс бохирдуулагч бодис, элементүүдийн зөвшөөрөгдөх дээд хэмжээ. Монгол Улсын стандарт – Стандартчилал, Хэмжилзүйн Үндэсний Төв. Улаанбаатар: , 2008.

214. Цогтхангай Д. и др. Оптимизация процесса выщелачивания медного концентрата азотной кислотой методом планирования эксперимента // Научно-технический Вестник Поволжья. 2011. № 1. С. 48–52.

215. Черненькова Т.В. Реакция лесной растительности на промышленное загрязнение. Москва: Наука, 2002. 191 с.

216. Чесноков Б.В., Бушмакин А.Ф. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна // Уральский минералогический сборник. 1995. № 5. С. 3–22.

217. Чудинов Б.С., Тюриков Ф.Т., Зубань П.Е. Древесина лиственницы и ее обработка. Москва: Изд-во «Лесная промышленность», 1965. 143 с.

218. Шагжиев К.Ш., Раднаев Б.Л., Ральдин Б.Б. Бурятия: природные ресурсы. Улан-Удэ: БГУ, 1997. 280 с.

219. Школьник М.Я. Микроэлементы в жизни растений. Ленинград: Наука, 1974. 324 с.

220. Щербенко Т.А. и др. Поглощение элементов питания и тяжелых металлов сосной в условиях атмосферного загрязнения // Вестник Моск. ун-та. Серия 17. Почвоведение. 2008. № 2. С. 9–15.

221. Экологические функции городских почв / под ред. А.С. Курбатова, В.Н. Башкин. Москва-Смоленск: Маджента, 2004. 232 с.

222. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Ценные элементы-примеси в углях. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 538 с.

223. Юнатов А.А. Основные черты растительного покрова Монгольской народной республики // Труды Монгольской комиссии АН СССР. Москва-Ленинград: Изд-во АН СССР, 1950. С. 223.

224. Юргенсон Г.А., Смирнова О.К., Меркулов Е.Б. Современное минералообразование в природно-техногенной системе Барун-Нарынского хранилища отходов обогатительного производства Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Современное минералообразование в природно-техногенной системе Барун-Нарынского хранилища отходов обогатительного производства Джидинского вольфрамо-молибденового комбината. 2008.

225. Юсупов Д.В. Применение биогеохимического и минералого-геохимическо- го методов поисков в золотоносных районах Верхнего Приамурья. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2013. 136 с.

226. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. … докт.геол.-мин.наук. Томск: , 2006. 47 с.

227. Янин Е.П. Введение в экологическую геохимию. Москва: ИМГРЭ, 1999. 67 с.

228. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. Москва: Геоинформмарк, 1993. 50 с.

229. Acosta J.A. et. al. Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation // J. Geochemical Explor. 2011. Т. 109. № 1-3. С. 8–17.

230. Adachi K., Tainosho Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust // Environ. Int. 2004. Т. 30. № 8. С. 1009–1017.

231. Ajmone-Marsan F., Biasioli M. Trace elements in soils of urban areas // Water. Air. Soil Pollut. 2010. Т. 213. № 1-4. С. 121–143.

232. Alvarez-Tinaut M.C., Leal A., Martinez L.R. Iron-manganese interaction and its relation to boron levels in tomato plants // Plant Soil. 1980. Т. 55. № 3. С. 377–388.

233. Anawar H.M. et. al. Arsenic, antimony, and other trace element contamination in a mine tailings affected area and uptake by tolerant plant species // Environ. Geochem. Health. 2011. Т. 33. № 4. С. 353–362.

234. Aznar J.-C. et. al. Lead Exclusion and Copper Translocation in Black Spruce Needles // Water. Air. Soil Pollut. 2009. Т. 203. № 1-4. С. 139–145.

235. Baker D.E., Chesnin L. Chemical Monitoring of Soils for Environmental Quality and Animal and Human Health // Adv. Agron. 1975. № 27. С. 305–374.

236. Battogtokh B., Lee J.M., Woo N. Contamination of water and soil by the Erdenet copper–molybdenum mine in Mongolia // Environ. Earth Sci. 2014. Т. 71. № 8. С. 3363–3374.

237. Bech J. et. al. Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru // Sci. Total Environ. 1997. Т. 203. № 1. С. 83–91.

238. Beckett P., Freer-Smith P.H., Taylor G. Effective Tree Species for Local Air-Quality Management // J. Arboric. 2000. Т. 26. № 1. С. 12 – 19.

239. Benin A.L. et. al. High Concentrations of Heavy Metals in Neighborhoods near Ore Smelters in Northern Mexico // Environ. Health Perspect. 1999. Т. 107. № 4. С. 279–284.

240. Berthelsen B.O. et. al. Heavy Metal Concentrations in Plants in Relation to Atmospheric Heavy Metal Deposition // J. Environ. Qual. 1995. Т. 24. № 5. С. 1018–1026.

241. Bhattacharya P. et. al. Arsenic in Soil and Groundwater Environment. Amsterdam: Elsevier, 2007. Вып. 1.

242. Birke M., Rauch U., Stummeyer J. Urban Geochemistry of Berlin, Germany // Mapping the Chemical Environment of Urban Areas. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. С. 245–268.

243. Bissen M., Frimmel F.H. Arsenic — a Review. Part I: Occurrence, Toxicity, Speciation,

Mobility // Acta Hydrochim. Hydrobiol. 2003. Т. 31. № 1. С. 9–18.

244. Blair R.D. et. al. Groundwater monitoring and contaminant occurrence at an abounded tailings area, Eliot Lake, Ontario // Proceedings of 1st international conference on uranium mine waste disposal. Vancouver: , 1980. С. 911–944.

245. Bontempi E. et. al. A new method for municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash inertization, based on colloidal silica // J. Environ. Monit. 2010. Т. 12. № 11. С. 2093.

246. Borman R.S., Watson D.M. Chemical processes in abounded sulfide tailings dumps and environmental implications for Northeastern New Brunswick // CIM Bull. 1976. Т. 69. № 772. С. 86–96.

247. Bowen H.J.M. Trace elements in biochemistry. London-New York: Academic press, 1966. 240 с.

248. Brekken A., Steinnes E. Seasonal concentrations of cadmium and zinc in native pasture plants: consequences for grazing animals // Sci. Total Environ. 2004. Т. 326. № 1-3. С. 181–195.

249. Brooks R.R. Biogeochemical Parameters and Their Significance for Mineral Exploration // J. Appl. Ecol. 1973. Т. 10. № 3. С. 825.

250. Candeias C. et. al. Assessment of soil contamination by potentially toxic elements in the aljustrel mining area in order to implement soil reclamation strategies // L. Degrad. Dev. 2011. Т. 22. № 6. С. 565–585.

251. Charlesworth S., Miguel E. De, Ordonez A. A review of the distribution of particulate trace elements in urban terrestrial environments and its application to considerations of risk // Environ. Geochem. Health. 2011. Т. 33. № 2. С. 103–123.

252. Chemistry and Biology of Solid Waste / под ред. W. Salomons, U. Forstner. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1988.

253. Conesa H.M. et. al. Influence of soil properties on trace element availability and plant accumulation in a Mediterranean salt marsh polluted by mining wastes: Implications for phytomanagement // Sci. Total Environ. 2011. Т. 409. № 20. С. 4470–4479.

254. Demetriades A., Birke M. Urban Geochemical Mapping Manual: Sampling, Sample preparation, Laboratory analysis, Quality control check, Statistical processing and Map plotting. Brussels: EuroGeoSurveys, 2015. 162 с.

255. Dubrovsky N.M. et. al. Geochemical evolution of inactive pyritic tailings in the Elliot Lake uranium district // Can. Geotech. J. 1985. Т. 22. № 1. С. 110–128.

256. ЕМС. Официальный сат КОО «Предприятие Эрдэнэт» (Электронный ресурс). URL: https://www.erdenetmc.mn/ (дата обращения: 12.07.2016).

257. Erdenet Carpet. Официальный сайт Erdenet Carpet LLC (Электронный ресурс). URL: http://www.carpet.mn/ (дата обращения: 12.07.2016).

258. Fernandez-Camacho R. et. al. Geochemical characterization of Cu-smelter emission plumes with impact in an urban area of SW Spain // Atmos. Res. 2010. Т. 96. № 4. С. 590–601.

259. Gandois L., Probst A. Localisation and mobility of trace metal in silver fir needles // Chemosphere. 2012. Т. 87. № 2. С. 204–210.

260. Garcia-Sanchez A., Alonso-Rojo P., Santos-Frances F. Distribution and mobility of arsenic in soils of a mining area (Western Spain) // Sci. Total Environ. 2010. Т. 408. № 19. С. 4194–4201.

261. Garmo T.H., Froslie A., Hoie R. Levels of Copper, Molybdenum, Sulphur, Zinc, Selenium, Iron and Manganese in Native Pasture Plants from a Mountain Area in Southern Norway // Acta Agric. Scand. 1986. Т. 36. № 2. С. 147–161.

262. Ghaderian S.M., Ghotbi Ravandi A.A. Accumulation of copper and other heavy metals by plants growing on Sarcheshmeh copper mining area, Iran // J. Geochemical Explor. 2012. Т. 123. С. 25–32.

263. Gietl J.K. et. al. Identification of brake wear particles and derivation of a quantitative tracer for brake dust at a major road // Atmos. Environ. 2010. Т. 44. № 2. С. 141–146.

264. Gjengedal E., Martinsen T., Steinnes E. Background levels of some major, trace, and rare earth elements in indigenous plant species growing in Norway and the influence of soil acidification, soil parent material, and seasonal variation on these levels // Environ. Monit. Assess. 2015. Т. 187. № 6. С. 1–28.

265. Goix S. et. al. Influence of source distribution and geochemical composition of aerosols on children exposure in the large polymetallic mining region of the Bolivian Altiplano // Sci. Total Environ. 2011. Т. 412-413. С. 170–184.

266. Goldschmidt V.M. Geochemische Verteilungsgesetze und kosmische Haufigkeit der Elemente // Naturwissenschaften. 1930. Т. 18. № 47-49. С. 999–1013.

267. Gomez-Alvarez A. et. al. Chemical partitioning of sediment contamination by heavy metals in the San Pedro River, Sonora, Mexico // Chem. Speciat. Bioavailab. 2007. Т. 19. № 1. С. 25–35.

268. Gomez-Alvarez A. et. al. Estimation of potential pollution from mine tailings in the San Pedro River (1993–2005), Mexico–US border // Environ. Geol. 2009. Т. 57. № 7. С. 1469–1479.

269. Gough L.P. et. al. Biogeochemical Characterization of an Undisturbed Highly Acidic, Metal-Rich Bryophyte Habitat, East-Central Alaska, U.S.A // Arctic, Antarct. Alp. Res. 2006. Т. 38. № 4. С. 522–529.

270. Graham R.D. Absorption of copper by plant roots, in Copper in Soils and Plants / под ред. J.F. Loneragan, A.D. Robson, R.D. Graham. New York: Academic Press, 1981. 141 с.

271. Greenwood N.N., Earnshaw A. Chemistry of the Elements. Second Edition. :

Butterworth-Heinemann, 1997. 1359 с.

272. Heavy Metals in Soils / под ред. B.J. Alloway. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. 614 с.

273. Hu Z., Gao S. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. Т. 253. № 3-4. С. 205–221.

274. Hudson-Edwards K.A., Jamieson H.E., Lottermoser B.G. Mine Wastes: Past, Present, Future // Elements. 2011. Т. 7. № 6. С. 375–380.

275. Iijima A. et. al. Particle size and composition distribution analysis of automotive brake abrasion dusts for the evaluation of antimony sources of airborne particulate matter // Atmos. Environ. 2007. Т. 41. № 23. С. 4908–4919.

276. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. Boca Raton: CRC Press, 2011. 548 с.

277. Kalas J.A. Environmental monitoring at Tjeldbergodden - monitoring of metal content in terrestrial food chains, 2001-2002. Tjeldbergodden: NINA (Norwegian Institute for Nature Research) Oppdragsmelding 796, 2003. 22 с.

278. KNMI. The Royal Netherlands Meteorological Institute Climate Explorer (Электронный ресурс). URL: https://climexp.knmi.nl (дата обращения: 01.07.2016).

279. Kohfahl C. et. al. The impact of cemented layers and hardpans on oxygen diffusivity in mining waste heaps A field study of the Halsbrücke lead–zinc mine tailings (Germany) // Sci. Total Environ. 2010. Т. 408. № 23. С. 5932–5939.

280. Kopponen P. et. al. Clonal differences in copper and zinc tolerance of birch in metal-supplemented soils // Environ. Pollut. 2001. Т. 112. № 1. С. 89–97.

281. Kosheleva N.E. et. al. Trace Element Composition of Poplar in Mongolian Cities // Biogenic-Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems Lecture Notes in Earth System Sciences. / под ред. O. V. Frank-Kamenetskaya, E.G. Panova, D.Y. Vlasov. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. С. 165–178.

282. Lavid N., Barkay Z., Tel-Or E. Accumulation of heavy metals in epidermal glands of the waterlily (Nymphaeaceae) // Planta. 2001. Т. 212. № 3. С. 313–322.

283. Lavrenko E.M., Karamysheva Z.V. Steppes of the former Soviet Union and Mongolia // Ecosystems of the World. 8B. Natural grasslands / под ред. R.T. Coupland. Amsterdam, London, New York, Tokyo: Elsevier Science, 1993. С. 3–59.

284. Limbeck A., Puls C. Particulate Emissions from On-Road Vehicles // Urban Airborne Particulate Matter / под ред. F. Zereini, C.L.S. Wiseman. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010. С. 63–79.

285. Lin Z.Q. et. al. Trace metal contamination in and on Balsam fir (abies Balsamea (L)

Mill.) Foliage in southern Quebec, Canada // Water, Air, Soil Pollut. 1995. Т. 81. № 1-2. С. 175–191.

286. Liu G. et. al. Spatial distribution and seasonal variations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using semi-permeable membrane devices (SPMD) and pine needles in the Pearl River Delta, South China // Atmos. Environ. 2006. Т. 40. № 17. С. 3134–3143.

287. Lizarraga-Mendiola L. et. al. Geochemical behavior of heavy metals in a Zn–Pb–Cu mining area in the State of Mexico (central Mexico) // Environ. Monit. Assess. 2009. Т. 155. № 1-4. С. 355–372.

288. Llugany M., Poschenrieder C., Barcelo J. Assessment of Barium Toxicity in Bush Beans // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2000. Т. 39. № 4. С. 440–444.

289. Lobersli E.M. Soil acidification and metal uptake in plants. Ph.D. dissertation. Norway: Department of Botany, University of Trondheim, College of Arts and Science, 1991.

290. Lobersli E.M., Steinnes E. Metal uptake in plants from a birch forest area near a copper smelter in Norway // Water. Air. Soil Pollut. 1988. Т. 37. № 1-2. С. 25–39.

291. Lopez M.L. et. al. Interannual environmental-soil thawing rate variation and its control on transpiration from Larix cajanderi, Central Yakutia, Eastern Siberia // J. Hydrol. 2007. Т. 338. № 3-4. С. 251–260.

292. Loredo J., Ordonez A., Alvares R. Environmental impact of toxic metals and metalloids from the Muñón Cimero mercury-mining area (Asturias, Spain) // J. Hazard. Mater. 2006. Т. 136. № 3. С. 455–467.

293. Mapping the Chemical Environment of Urban Areas / под ред. C.C. Johnson et. al. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2011. 616 с.

294. Margui E. et. al. Assessment of metal availability to vegetation (Betula pendula) in Pb-Zn ore concentrate residues with different features // Environ. Pollut. 2007. Т. 145. № 1. С. 179–184.

295. Markert B. Establishing of «Reference Plant» for inorganic characterization of different plant species by chemical fingerprinting // Water, Air, Soil Pollut. 1992. Т. 64. № 3-4. С. 533–538.

296. Meza-Figueroa D. et. al. The impact of unconfined mine tailings in residential areas from a mining town in a semi-arid environment: Nacozari, Sonora, Mexico // Chemosphere. 2009. Т. 77. № 1. С. 140–147.

297. Mico C. et. al. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis // Chemosphere. 2006. Т. 65. № 5. С. 863–872.

298. Milu V., Leroy J., Peiffert C. Water contamination downstream from a copper mine in the Apuseni Mountains, Romania // Environ. Geol. 2002. Т. 42. № 7. С. 773–782.

299. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications // Hydrol. Process. 1991. Т. 5. № 1. С. 3–30.

300. Muller C., Riederer M. Plant Surface Properties in Chemical Ecology // J. Chem. Ecol. 2005. Т. 31. № 11. С. 2621–2651.

301. Nordstrom D.K. Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals // Acid Sulfate Weathering. Madison: Soil Science Society of America, 1982. С. 37–59.

302. Ohlson M., Staaland H. Mineral diversity in wild plants: benefits and bane for moose // Oikos. 2001. Т. 94. № 3. С. 442–454.

303. Owor M. et. al. Impact of tailings from the Kilembe copper mining district on Lake George, Uganda // Environ. Geol. 2007. Т. 51. № 6. С. 1065–1075.

304. Pacyna E.G. et. al. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe // Atmos. Environ. 2007. Т. 41. № 38. С. 8557–8566.

305. Pellegrini S. et. al. Pedogenesis in mine tails affects macroporosity, hydrological properties, and pollutant flow // Catena. 2016. Т. 136. С. 3–16.

306. Quiroz W. et. al. Antimony speciation in road dust and urban particulate matter in Valparaiso, Chile: Analytical and environmental considerations // Microchem. J. 2013. Т. 110. С. 266–272.

307. Raitio H., Tuovinen J.-P., Anttila P. Relation between sulphur concentrations in the Scots pine needles and the air in northernmost Europe // Water, Air, Soil Pollut. 1995. Т. 85. № 3. С. 1361–1366.

308. Rastmanesh F. et. al. Heavy metal enrichment of soil in Sarcheshmeh copper complex, Kerman, Iran // Environ. Earth Sci. 2011. Т. 62. № 2. С. 329–336.

309. Rautio P., Huttunen S. Total vs. internal element concentrations in Scots pine needles along a sulphur and metal pollution gradient // Environ. Pollut. 2003. Т. 122. № 2. С. 273–289.

310. Reimann C. et. al. Influence of extreme pollution on the inorganic chemical composition of some plants // Environ. Pollut. 2001. Т. 115. № 2. С. 239–252.

311. Rey J. et. al. Heavy metal pollution in the Quaternary Garza basin: A multidisciplinary study of the environmental risks posed by mining (Linares, southern Spain) // Catena. 2013. Т. 110. С. 234–242.

312. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. : Elsevier Science, 2003. С. 1–64.

313. Santos E.S. et. al. Trace element distribution in soils developed on gossan mine wastes and Cistus ladanifer L. tolerance and bioaccumulation // J. Geochemical Explor. 2012. Т. 123. С. 45–51.

314. Serbula S.M. et. al. Assessment of airborne heavy metal pollution using plant parts and topsoil // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2012. Т. 76. С. 209–214.

315. Sommer M., Schlichting E. Archetypes of catenas in respect to matter - A concept for structuring and grouping catenas // Geoderma. 1997. Т. 76. № 1-2. С. 1–33.

316. Steinnes E. et. al. A Gradient Study of 34 Elements in the Vicinity of a Copper-Nickel Smelter in the Kola Peninsula // Environ. Monit. Assess. 2000. Т. 60. № 1. С. 71–88.

317. Stubblefield A. et. al. Impacts of gold mining and land use alterations on the water quality of central Mongolian rivers // Integr. Environ. Assess. Manag. 2005. Т. 1. № 4. С. 365–373.

318. Suwa R. et. al. Barium Toxicity Effects in Soybean Plants // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2008. Т. 55. № 3. С. 397–403.

319. Timofeev I. V., Kosheleva N.E. Geochemical disturbance of soil cover in the nonferrous mining centers of the Selenga River basin // Environ. Geochem. Health. 2016.

320. Tomasevic M. et. al. Deciduous tree leaves in trace elements biomonitoring: A contribution to methodology // Ecol. Indic. 2011. Т. 11. № 6. С. 1689–1695.

321. Trimbacher C., Weiss P. Norway Spruce: A Novel Method using Surface Characteristics and Heavy Metal Concentrations of Needles for a Large-Scale Monitoring Survey in Austria // Water, Air, Soil Pollut. 2004. Т. 152. № 1-4. С. 363–386.

322. Vega F.A. et. al. Influence of mineral and organic components on copper, lead, and zinc sorption by acid soils // J. Environ. Sci. Heal. Part A. 2007. Т. 42. № 14. С. 2167–2173.

323. Violante A. et. al. Sorption and Desorption of Arsenic by Soil Minerals and Soils in the Presence of Nutrients and Organics // Soil Mineral Microbe-Organic Interactions. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. С. 39–69.

324. Wahsha M. et. al. Toxicity assessment of contaminated soils from a mining area in Northeast Italy by using lipid peroxidation assay // J. Geochemical Explor. 2012. Т. 113. С. 112–117.

325. Wang X.S., Qin Y. Leaching Characteristics of Heavy Metals and As from Two Urban Roadside Soils // Environ. Monit. Assess. 2007. Т. 132. № 1-3. С. 83–92.

326. Watanabe Y., Stein H.J. Re-os ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implications // Econ. Geol. 2000. Т. 95. № 7. С. 1537–1542.

327. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. Т. 59. № 7. С. 1217–1232.

328. WHO W.H.O. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report on a WHO Working Group, Regional Office for Europe. Bonn, Germany: , 2003. 95 с.

329. Wyttenbach A. et. al. The accumulation of arsenic, bromine and iodine in needles of Norway Spruce (Picea Abies (L.) karst.) At sites with low pollution // Water, Air, Soil Pollut. 1997. Т. 94. № 3-4. С. 417–430.

330. Zevenbergen L.W., Thorne C.R. Quantitative analysis of land surface topography // Earth Surf. Process. Landforms. 1987. Т. 12. С. 47–56.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Содержание ТММ и физико-химических свойств поверхностных горизонтов почв и ТПО в зоне влияния ДВМК

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
1	Zk-12-001	*Ss*	4	130	65	15	38	64	93	5,3	280	4,1	0,34	3	0,86	500	7,3	21	0,92	11	0,14	6,5	4,6	11,3	55,4	38,7	5,9
2	Zk-12-002	*Ss*	4	130	53	14	30	60	83	4,9	270	2,5	0,24	3	0,7	530	4,5	19	0,37	12	0,14	6,2	4,3	11,3	57,5	37,0	5,5
3	Zk-12-003	*Ss*	4	130	63	16	35	66	120	4,7	270	6	0,42	2,7	1,3	510	9,8	28	0,67	11	0,14	6,5	4,9	11,3	53,7	40,3	6,0
4	Zk-12-004	*B*	4	81	45	11	26	59	54	3	150	4,4	0,26	2,2	0,83	380	8,3	18	0,54	7,2	0,06	4,4	4,4	24,0	69,3	27,6	3,1
5	Zk-12-005	*Ss*	4	130	65	16	38	49	130	5,4	280	4,8	0,35	2,9	1,4	540	8	32	0,6	11	0,14	6,7	5,0	11,9	59,2	36,1	4,8
6	Zk-12-006	*R*	4	140	63	19	39	48	97	6,2	340	1,4	0,27	2,9	1,3	520	4,4	24	0,24	13	0,12	6,8	7,7	1,2	70,7	24,8	4,5
7	Zk-12-007	*B*	4	150	37	19	26	47	150	6	480	1,4	0,25	2,7	1,1	1200	3,1	21	0,3	12	0,43	7,6	5,6	9,1	61,6	33,5	5,0
8	Zk-12-008	*B*	4	150	39	19	27	52	130	5,1	250	1,5	0,23	2,4	1,6	720	3,8	20	0,22	12	0,25	7,2	5,6	8,1	58,5	36,4	5,1
9	Zk-12-009	*B*	4	180	53	29	34	77	140	4,4	370	3,6	0,38	3,8	3,1	610	12	24	0,59	12	0,22	7,9	5,7	8,5	71,0	25,6	3,3
10	Zk-12-010	*Ss*	4	140	67	18	42	72	150	7,2	300	5,8	0,83	3,6	5,4	550	42	92	1,5	13	0,13	7,1	5,5	10,5	63,7	32,0	4,3
11	Zk-12-011	*Ss*	4	120	50	16	42	66	170	4,5	310	5	1	13	2,4	550	11	32	1,1	12	0,11	4,4	6,8	12,0	62,9	33,3	3,8
12	Zk-12-012	*Ss*	1	130	82	22	54	71	340	8,5	310	3,7	1,1	3,8	5,9	730	13	65	0,8	17	0,15	7,0	7,3	6,3	60,2	34,5	5,3
13	Zk-12-013	*Ss*	4	150	55	16	34	52	130	8,1	320	2,1	0,39	3,8	1	590	5	23	0,54	12	0,15	7,1	6,4	5,0	63,0	32,2	4,8
14	Zk-12-014	*Ss*	4	260	69	28	63	69	89	8,8	350	1,1	0,2	2,3	1,1	630	4,3	17	0,27	17	0,14	8,0	6,5	0,6	73,3	20,6	6,1
15	Zk-12-016	*B*	1	140	55	16	31	48	120	6,4	340	4,6	0,38	3,3	1,7	530	7,7	25	0,66	12	0,14	6,9	5,4	6,2	61,9	33,4	4,7
16	Zk-12-017	*B*	1	140	58	14	30	30	100	5,5	390	5,4	0,3	3,5	2,7	550	9,7	21	0,38	12	0,11	6,7	5,0	0,4	77,8	19,6	2,6

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
17	Zk-12-018	*Ss*	1	120	60	15	34	56	150	6	270	7,6	0,52	4,7	4,8	560	13	170	1,8	11	0,15	6,4	5,8	7,9	57,1	37,7	5,2
18	Zk-12-019	*Sm*	1	130	51	14	27	42	170	6,1	320	7,9	0,7	4,2	2,8	570	53	57	2,8	12	0,14	6,5	6,2	6,8	66,1	29,2	4,7
19	Zk-12-020	*I*	1	140	52	69	59	240	980	5,6	240	22	13	5	3,7	440	500	130	25	16	0,45	6,3	6,5	6,0	70,8	25,9	3,3
20	Zk-12-021	*Sm*	1	180	66	18	37	25	80	4,5	250	2,4	0,3	2,6	0,71	590	10	24	0,74	18	0,09	6,1	4,8	5,5	58,7	35,5	5,9
21	Zk-12-022	*Sm*	1	160	61	24	50	38	140	4,9	410	4,2	1,1	2,3	2,1	610	36	38	2,7	15	0,14	5,5	7,0	2,3	78,2	19,0	2,7
22	Zk-12-023	*Sm*	1	140	62	16	49	94	290	6,5	380	13	2,1	5,2	4,4	700	82	130	5,3	15	0,11	5,2	6,9	6,8	76,3	20,5	3,2
23	Zk-12-024	*I*	1	180	67	24	79	320	720	16	220	50	9,8	6,4	43	480	350	1000	29	14	0,16	6,1	5,4	5,3	74,3	22,1	3,6
24	Zk-12-025	*I*	1	190	67	18	92	140	410	7,7	340	12	3,2	4,6	5	530	140	140	5,7	12	0,16	8,9	7,4	2,7	74,5	21,9	3,6
25	Zk-12-026	*R*	1	120	40	12	24	42	160	4,7	320	9,7	1,1	3,7	3	460	68	47	2,3	13	0,12	6,0	5,4	7,1	77,8	19,4	2,8
26	Zk-12-027	*Sm*	1	140	39	14	23	44	120	3,6	350	6,8	0,67	3,5	2,5	610	55	59	2,6	17	0,08	4,7	6,8	5,4	74,7	21,5	3,8
27	Zk-12-028	*I*	1	130	50	19	44	87	290	7,3	300	33	2,1	4,8	9,8	3200	420	250	13	15	0,11	5,2	7,4	7,0	72,6	23,8	3,6
28	Zk-12-029	*I*	1	170	49	19	43	48	180	5,3	330	8,3	1,6	3,1	2,3	620	47	36	3,5	16	0,25	6,3	6,2	4,5	68,3	27,3	4,4
29	Zk-12-030	*Sm*	1	100	44	13	28	59	430	4,1	290	7,6	2,7	3,7	2,1	530	42	43	2,2	10	0,16	5,1	5,2	15,9	71,6	25,2	3,2
30	Zk-12-031	*I*	1	150	64	17	50	32	90	6,8	320	52	0,48	3,4	3,7	610	280	58	6,4	15	0,10	5,7	6,4	4,2	54,3	39,0	6,7
31	Zk-12-032	*I*	1	160	30	24	22	170	350	5,2	340	32	4,5	4	9,1	600	150	230	9,4	18	0,15	5,3	5,5	1,1	85,0	12,8	2,3
32	Zk-12-034	*I*	1	170	100	20	64	24	78	5,6	280	3	0,26	2,1	0,98	540	6,5	22	0,89	15	0,12	5,4	5,6	5,5	68,3	27,6	4,0
33	Zk-12-037	*Ss*	1	140	68	16	32	34	140	6,4	350	3,5	0,38	3,8	1,5	680	30	30	1,4	13	0,17	7,4	6,4	4,9	59,5	34,2	6,3
34	Zk-12-038	*Ss*	1	200	59	19	32	29	90	6,1	300	2,9	0,2	2,8	1,2	670	10	22	1,1	19	0,12	7,5	5,3	0,4	61,1	33,1	5,8

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
35	Zk-12-039	*Ss*	1	120	62	16	34	57	270	5,1	300	3,4	0,48	3,4	1,3	630	12	35	1,3	11	0,17	6,4	6,4	9,4	57,9	36,0	6,1
36	Zk-12-040	*Ss*	4	100	49	13	40	46	160	4,5	310	4	43	2,6	1,2	560	10	30	1,1	12	0,09	3,8	6,4	8,0	73,1	23,5	3,4
37	Zk-12-041	*I*	4	150	57	16	28	48	180	6,2	360	3,3	0,4	3,3	1,8	580	14	25	1,2	13	0,13	7,4	6,6	3,7	63,7	31,3	5,0
38	Zk-12-042	*Ss*	4	200	61	16	33	60	130	5,2	390	3	0,56	5	1,3	550	7,4	36	0,57	13	0,14	8,2	6,5	3,2	77,2	19,9	2,9
39	Zk-12-043	*Ss*	4	180	72	24	57	81	200	6,7	290	3,5	0,46	2,8	2,3	640	10	27	1,2	16	0,12	6,6	5,5	6,9	58,6	36,0	5,4
40	Zk-12-044	*Ss*	4	160	73	19	39	57	280	8,1	310	5,4	0,69	4,7	4	670	22	140	1,8	13	0,16	8,3	5,1	6,3	56,5	37,4	6,2
41	Zk-12-045	*B*	1	100	63	12	41	28	78	16	210	1,9	0,31	2,6	1,5	550	4,6	22	0,44	10	0,10	5,5	5,3	21,5	62,9	33,3	3,8
42	Zk-12-046	*I*	3	130	69	15	37	120	270	5,8	310	6,9	1,3	7	4,9	650	43	87	3	12	0,18	6,8	6,4	6,7	65,6	29,7	4,7
43	Zk-12-047	*I*	1	120	78	17	54	42	190	9	280	2,3	0,5	4	1,5	510	13	50	0,89	12	0,13	6,4	5,0	10,6	68,5	27,9	3,6
44	Zk-12-048	*I*	1	150	140	49	69	360	920	5,5	120	21	11	9,9	14	190	1400	1100	79	14	0,20	10,0	3,6	2,0	83,4	14,5	2,1
45	Zk-12-049	*R*	2	130	69	15	32	30	89	4,6	270	3,4	0,23	2,9	0,99	650	15	34	1,1	14	0,14	6,9	5,1	6,0	54,5	39,0	6,5
46	Zk-12-050	*B*	2	190	41	15	20	18	85	4	140	1,8	0,18	2,3	1,9	800	6	15	0,26	18	0,27	7,1	5,5	5,5	51,9	41,4	6,7
47	Zk-12-051	*B*	3	14	8,6	3,3	11	27	37	1	150	2,1	0,23	1,3	0,64	290	2,1	5,9	0,19	1,6	0,05	0,8	6,1	46,5	72,4	25,7	2,0
48	Zk-12-052	*R*	3	33	14	34	26	26	27	4,6	95	6,7	0,19	1,4	0,65	300	4,2	16	0,6	2,4	0,68	3,5	5,4	38,8	70,2	27,4	2,4
49	Zk-12-053	*R*	1	170	72	12	35	17	63	5,4	430	1,5	0,16	2,5	0,91	520	36	16	0,29	13	0,11	7,7	7,2	0,5	88,3	9,9	1,8
50	Zk-12-054	*I*	1	29	17	4,1	14	23	35	1,5	160	2,7	0,18	1,7	0,54	180	5,2	9	0,38	3,3	0,07	1,6	5,6	41,6	69,2	28,5	2,3
51	Zk-12-055	*I*	3	180	81	24	52	22	88	18	230	3,1	0,23	2,5	1,1	500	25	33	1,4	17	0,23	6,7	4,8	5,5	56,4	37,3	6,3
52	Zk-12-056	*I*	3	120	36	23	28	220	710	5,7	420	5,4	6,8	4,4	2,7	620	40	51	2,3	18	0,18	6,3	4,7	6,2	59,1	35,9	5,1

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
53	Zk-12-057	*B*	3	170	46	18	39	28	95	5,4	180	3,1	0,24	2,1	1,1	570	62	19	0,74	16	0,26	6,2	5,5	6,0	50,5	43,5	6,0
54	Zk-12-058	*I*	3	170	34	17	31	51	130	4,6	160	5,4	0,44	1,9	1,9	590	43	37	2,2	17	0,38	6,8	5,3	6,8	53,8	40,4	5,9
55	Zk-12-059	*I*	3	130	81	7,5	19	230	950	1,4	120	24	10	14	7,1	280	1500	1000	61	15	0,24	5,8	3,6	0,3	82,4	15,2	2,4
56	Zk-12-060	*I*	1	220	240	7,6	11	80	320	4,2	170	40	8	11	30	310	1100	1100	76	19	0,21	11,0	3,4	0,6	83,3	13,4	3,3
57	Zk-12-061	*I*	1	150	110	41	59	330	1100	4,7	96	20	13	9,2	13	170	960	720	59	14	0,20	9,5	4,0	1,0	90,8	7,9	1,3
58	Zk-12-062	*I*	4	82	29	6,1	12	400	790	18	87	51	11	6,3	61	220	720	1300	31	11	0,10	2,6	4,2	0,4	88,2	10,1	1,7
59	Zk-12-063	*I*	4	100	67	6,8	24	300	630	2,5	120	54	7,7	18	9,3	270	860	1200	78	14	0,21	4,3	3,8	0,8	50,4	44,9	4,7
60	Zk-12-064	*I*	1	120	66	21	82	48	120	7,5	210	3,2	0,45	2,9	1	390	19	43	1,2	14	0,18	9,9	4,7	7,4	55,6	38,1	6,3
61	Zk-12-065	*B*	1	140	88	18	55	30	97	6,1	270	2,9	0,31	2,7	0,87	440	6,3	29	0,55	12	0,16	7,1	5,1	6,9	63,7	32,4	3,9
62	Zk-12-066	*R*	4	210	75	24	49	52	100	4,9	240	3,7	0,27	2,5	1,8	780	21	40	1,1	16	0,26	6,4	4,7	6,5	59,0	35,5	5,6
63	Zk-12-067	*B*	4	310	61	31	57	200	140	4,5	260	8,3	0,72	2,4	1,3	580	19	23	0,69	16	0,24	9,3	5,0	6,3	65,4	30,9	3,7
64	Zk-12-068	*B*	4	190	67	24	34	130	120	4,5	240	6,8	0,36	2,6	1,5	710	12	48	0,84	11	0,33	9,0	5,0	11,2	66,1	29,9	4,0
65	Zk-12-069	*R*	4	110	50	12	25	22	100	3,7	230	3,3	0,35	3,6	1,2	820	25	84	1,1	13	0,16	5,9	5,3	4,5	61,8	32,6	5,6
66	Zk-12-070	*R*	4	150	62	15	30	25	90	5,8	280	2,5	0,22	3,6	0,93	620	9,4	42	0,53	13	0,09	7,2	4,7	2,2	63,1	31,0	6,0
67	Zk-12-071	*Ss*	4	180	72	21	50	92	110	5,5	260	13	0,57	2,3	2,1	630	80	72	1,6	14	0,16	6,2	5,1	7,3	58,5	36,1	5,4
68	Zk-12-072	*I*	4	130	70	16	36	65	120	5,3	230	49	0,72	3,4	3,6	570	55	65	4,3	12	0,19	7,0	4,8	11,0	59,3	35,7	5,0
69	Zk-12-073	*I*	4	140	71	15	35	51	140	5,8	300	29	0,65	3,9	4,3	540	56	130	4,3	12	0,12	7,0	5,1	3,7	60,9	33,7	5,4
70	Zk-12-074	*I*	4	100	26	5,1	15	150	980	16	110	26	9,4	6,9	59	270	900	1300	35	11	0,12	3,2	4,6	0,1	92,1	6,5	1,4

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
71	Zk-12-075	*I*	4	160	83	30	68	1000	900	13	260	19	18	2,8	27	540	140	610	14	15	0,11	6,6	3,6	1,1	65,7	29,2	5,2
72	Zk-12-076	*I*	4	120	62	19	35	260	560	11	320	370	6,7	8,2	23	470	430	490	64	11	0,15	6,9	7,4	5,7	77,2	19,8	2,9
73	Zk-12-077	*I*	4	180	60	21	50	170	320	9,1	290	40	3,3	5,1	17	520	390	420	16	17	0,15	6,4	7,7	1,5	76,3	20,6	3,1
74	Zk-12-078	*R*	4	180	79	18	48	24	100	4,5	250	7,1	0,29	3	1,4	730	15	27	0,95	16	0,14	5,8	4,6	6,2	75,1	20,8	4,1
75	Zk-12-079	*I*	4	130	71	15	29	240	450	7,4	190	130	6,2	10	16	650	590	410	40	12	0,24	6,4	5,0	6,7	62,6	32,6	4,8
76	Zk-12-080	*I*	1	100	46	17	24	270	530	32	240	200	7	7,8	120	450	520	950	35	11	0,17	6,0	6,7	2,3	81,9	15,8	2,3
77	Zk-12-081	*B*	4	300	41	37	97	120	180	5,5	270	3,8	0,39	2,1	0,99	710	5,9	29	0,38	15	0,48	9,7	6,0	10,9	79,3	18,3	2,4
78	Zk-12-082	*B*	4	250	42	29	31	120	170	4,2	320	5,1	0,36	2,5	1,9	660	8,1	27	0,66	12	0,38	11,0	5,8	10,4	64,9	31,1	4,0
79	Zk-12-083	*B*	4	310	52	38	67	120	200	5,5	280	3,6	0,38	2,8	2,5	660	100	23	0,43	17	0,39	10,0	5,8	8,0	72,6	24,1	3,3
80	Zk-12-084	*R*	4	360	50	32	35	170	190	4,1	380	2,8	0,22	2,5	0,96	570	4,5	16	0,31	13	0,31	14,0	5,9	3,6	63,2	32,0	4,8
81	Zk-12-085	*R*	4	180	36	18	24	71	170	3,7	290	5,5	0,41	3,4	4,9	930	12	33	0,76	12	0,39	8,5	5,4	9,8	68,2	28,1	3,6
82	Zk-12-086	*B*	4	160	38	17	22	34	100	5,6	340	2,7	0,27	2,5	0,71	910	6,6	18	0,38	14	0,17	7,9	5,5	10,3	66,8	29,2	3,9
83	Zk-12-087	*B*	4	170	51	18	40	51	130	4,4	240	3	0,35	1,8	1,2	1000	60	30	0,58	16	0,44	5,1	6,1	13,8	73,9	22,9	3,2
84	Zk-12-088	*R*	4	210	59	27	35	84	150	3,8	350	3,1	0,32	2,7	0,93	690	6	20	0,6	14	0,33	9,7	6,2	4,7	77,9	19,6	2,5
85	Zk-12-089	*B*	4	200	45	21	43	44	120	4	280	2,9	0,24	1,9	1,1	790	7,6	21	0,34	19	0,21	6,9	5,6	4,1	71,9	24,6	3,4
86	Zk-12-090	*B*	4	180	42	19	26	51	120	6,7	280	4,7	0,29	3	2,7	520	9,7	27	0,8	15	0,13	8,0	5,9	3,8	67,8	28,3	3,9
87	Zk-12-091	*I*	1	120	37	15	26	280	700	39	200	100	10	6,2	140	430	670	1000	30	15	0,14	4,7	4,2	1,1	77,8	19,1	3,1
88	Zk-12-092	*R*	4	150	68	18	32	42	88	5,3	280	11	0,28	3,1	1,6	680	28	36	1,3	13	0,19	7,0	4,7	7,5	60,4	34,5	5,1

№	Точка	Функциональная зона	Почвообразующая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойства поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
89	Zk-12-093	*I*	4	150	67	20	40	100	160	5,2	280	20	0,91	4,3	2,7	760	55	100	4,4	14	0,27	7,4	5,0	6,9	66,8	29,0	4,2
90	Zk-12-094	*I*	4	150	76	15	42	67	120	7,2	320	9,3	0,51	3,4	2,8	560	40	64	3,5	13	0,10	7,4	5,0	2,1	66,8	28,3	4,9
91	Zk-12-095	*I*	1	90	33	26	34	1800	1400	120	170	280	33	9,6	440	350	1300	1500	55	12	0,11	5,0	4,4	0,7	91,3	7,3	1,4
92	Zk-12-096	*I*	1	62	19	10	13	350	470	17	120	280	7,3	7,5	82	390	680	730	62	12	0,08	3,8	4,9	0,8	90,1	8,3	1,6
93	Zk-12-099	*R*	1	120	58	14	35	31	95	8,5	400	3,1	0,34	2,5	1,4	570	11	26	0,73	12	0,13	5,8	5,5	6,3	75,9	21,1	3,1
94	Zk-12-100	*Ss*	1	160	81	20	53	34	110	7,4	340	4,9	0,48	2,1	1,8	660	78	31	1,1	17	0,13	6,1	6,1	5,3	51,9	40,2	7,9
95	Zk-12-101	*Ss*	1	130	72	15	43	41	130	6,4	350	12	0,56	3,4	2,5	550	23	56	2,1	12	0,12	6,7	6,5	3,5	67,4	27,9	4,7
96	Zk-12-102	*Ss*	1	150	77	15	39	25	100	7,5	360	2,5	0,28	3	1,4	600	12	24	0,8	13	0,13	7,4	5,7	2,7	68,5	26,8	4,7
97	Zk-12-103	*I*	3	140	80	14	37	25	95	6,5	410	2,1	0,25	4,1	1,4	590	6,9	21	0,47	13	0,10	7,0	6,4	1,5	77,3	19,3	3,4
98	Zk-12-104	*I*	1	150	89	20	81	36	140	7,2	290	5,5	0,52	2,8	2,1	530	25	44	1,7	14	0,12	5,6	6,4	7,5	66,2	29,7	4,2
99	Zk-12-105	*I*	3	210	71	16	33	130	250	6,2	160	480	1,9	7,1	5,9	400	350	230	60	12	0,19	10,0	4,4	5,0	51,9	40,7	7,4
100	Zk-12-106	*I*	3	240	71	12	27	88	190	11	170	56	0,75	4,8	4,9	410	410	140	18	13	0,22	14,0	4,6	6,8	64,7	30,6	4,7
101	Zk-12-107	*B*	4	140	44	17	20	58	150	5,2	130	48	0,55	3,1	2,2	430	220	100	9,8	9,7	0,41	8,5	4,5	17,7	60,1	35,3	4,6
102	Zk-12-109	*I*	3	120	99	72	87	350	380	6,2	150	130	3,1	4,4	2,6	420	120	160	57	12	0,21	8,4	4,3	5,9	51,8	41,6	6,7
103	Zk-12-111	*I*	3	160	120	22	57	41	120	15	180	15	0,46	3	0,96	550	20	40	2,6	13	0,25	8,2	4,4	8,3	52,9	41,7	5,5
104	Zk-12-113	*I*	1	240	57	19	30	96	200	5,3	310	25	0,74	4,9	1,8	400	520	170	43	14	0,19	12,0	5,4	1,9	67,6	28,3	4,1
105	Zk-12-114	*I*	1	160	63	15	33	75	210	5,7	220	29	1,1	6,4	3,1	450	380	140	21	14	0,16	8,5	4,9	6,4	60,4	34,4	5,2
106	Zk-12-115	*Ss*	1	140	80	13	36	17	81	4,6	350	3,1	0,18	2,4	0,74	510	15	26	1,2	13	0,12	7,1	6,4	1,9	75,1	21,2	3,7

№	Точка	Функциональная зона	Почвообразующая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойства поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
107	Zk-12-116	*B*	1	89	80	11	47	31	110	4,3	210	2,3	0,36	3,6	0,66	440	9,9	20	0,66	8,3	0,12	4,7	4,6	17,6	75,2	22,2	2,6
108	Zk-12-118	*Ss*	1	130	77	13	37	52	170	5,5	340	36	0,94	3,5	3	520	44	83	11	13	0,11	5,4	6,0	7,8	69,1	27,6	3,3
109	Zk-12-119	*Ss*	1	140	100	18	70	28	110	4	340	3	0,28	1,7	0,79	570	4,7	17	0,37	14	0,10	5,0	6,5	7,5	68,9	27,6	3,5
110	Zk-12-120	*Ss*	1	85	39	9,6	21	83	210	4,4	270	57	1,9	5,1	5,9	370	90	150	13	9,6	0,16	4,1	5,3	16,9	70,1	26,8	3,1
111	Zk-12-121	*R*	1	71	8	3	5,3	100	220	4,3	99	150	2,4	14	14	310	320	280	34	13	0,12	2,8	3,5	0,5	87,9	10,2	1,9
112	Zk-12-122	*R*	1	130	120	15	60	35	98	4,7	320	18	0,49	3	1,7	500	33	43	4	13	0,13	6,1	5,2	7,2	77,1	20,6	2,3
113	Zk-12-123	*I*	1	41	7,5	1,2	4,9	32	140	4,8	87	260	2	12	13	380	940	300	70	12	0,08	1,7	6,2	0,3	95,4	3,5	1,1
114	Zk-12-124	*I*	1	130	38	16	21	140	470	8,5	370	58	6,3	4,5	21	560	300	220	15	16	0,18	6,0	4,4	0,3	90,7	7,8	1,6
115	Zk-12-125	*R*	1	140	110	17	71	25	100	5,2	360	13	0,4	2,1	1,4	540	24	27	2,4	15	0,13	5,3	6,0	9,3	80,5	17,6	1,9
116	Zk-12-126	*R*	1	100	72	13	41	35	140	4,3	290	43	1,8	2,7	2,6	400	42	86	10	11	0,15	4,7	4,6	13,4	74,5	23,1	2,4
117	Zk-12-127	*R*	1	140	100	23	85	99	240	6,8	260	49	2,4	4,8	7,3	560	96	160	15	15	0,15	5,8	4,9	8,1	65,2	31,3	3,6
118	Zk-12-131	*R*	1	120	110	13	46	38	120	4,4	310	26	0,79	1,9	2,9	430	39	100	7,6	12	0,12	5,5	4,8	8,9	83,7	14,7	1,6
119	Zk-12-132	*R*	1	100	88	11	42	29	110	3,2	290	7,7	0,58	2,3	1,1	420	29	34	2,3	10	0,10	4,3	5,6	14,8	79,8	18,0	2,2
120	Zk-12-133	*R*	1	96	58	11	29	27	95	3,7	310	7,1	0,55	2,6	1,8	430	31	32	2,2	10	0,27	4,5	5,2	15,2	75,1	22,3	2,6
121	Zk-12-134	*I*	1	150	67	18	27	80	210	6,1	270	67	2	5,5	3,8	550	300	150	16	14	0,24	6,3	5,1	8,5	55,3	38,7	6,0
122	Zk-12-135	*I*	1	180	57	28	37	120	380	3,9	280	31	3,7	7,5	3,7	450	630	180	20	17	0,23	6,2	5,4	0,8	71,9	24,9	3,2
123	Zk-12-136	*I*	1	150	54	33	25	140	360	4,7	260	41	4,2	5,5	5,1	480	540	170	23	14	0,35	7,5	5,9	10,2	69,4	27,4	3,1
124	Zk-12-137	*I*	1	160	63	78	32	400	400	5	250	47	9,7	3,9	4,9	440	480	250	19	14	0,67	8,5	4,8	7,4	70,6	25,8	3,6

№	Точка	Функциональная зона	Почвообразующая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойства поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
125	Zk-12-138	*B*	4	130	60	13	24	52	98	5,4	220	17	0,58	3,8	1,6	590	39	47	2,5	12	0,22	5,5	4,2	16,8	68,4	28,4	3,2
126	Zk-12-139	*I*	4	140	66	16	28	32	150	5	220	11	0,43	2,2	1,4	1000	30	34	1,3	13	0,50	6,2	4,9	11,7	62,3	33,5	4,3
127	Zk-12-140	*I*	4	140	62	15	24	41	120	5,3	250	37	0,57	2,6	2,7	620	49	72	3,3	13	0,30	5,9	5,1	11,7	58,1	36,5	5,4
128	Zk-12-141	*R*	1	170	67	21	45	53	330	5,9	350	12	2,1	3,3	3,7	990	51	110	3,1	16	0,16	6,2	6,3	10,0	73,6	23,3	3,1
129	Zk-13-14 (1)	*B*	2	180	72	19	31	41	78	9,1	120	0,96	0,13	1,7	3,7	510	3,8	18	0,39	17	0,73	9,1	5,3	1,3	72,3	24,3	3,4
130	Zk-13-28 (1)	*B*	3	90	62	17	48	35	200	4,6	320	5,1	0,89	1,9	1,2	1100	7,6	90	0,69	11	0,87	6,2	5,5	13,2	72,5	24,4	3,1
131	Zk-13-34 (1)	*B*	3	130	25	16	13	67	120	3	170	10	0,52	1,6	2	390	53	47	2,9	13	0,68	8,3	5,8	11,9	70,5	26	3,5
132	Zk-13-12 (1)	*B*	1	150	72	18	37	46	88	7,9	320	4,3	0,28	1,9	5,6	530	4,5	20	0,49	15	0,15	7,6	5,4	10,8	68,1	28,6	3,3

Примечание. Функциональные зоны: *I* – промышленная; *T* – транспортная; *Sm* и *Ss* – селитебные с многоэтажной и одноэтажной (дачной) застройкой соответственно; *R* – природно-рекреационная; *B* – фоновая. Почвообразующие породы: 1 – четвертичных отложениях;: 2 – среднепермской-нижнетриасовой чернояровской свите; 3 – кембрийской комплексе (джидинская и хохюртовская свиты); 4 – палеозойский джидинской комплекс (первая фаза).

Приложение 2. Содержание ТММ и физико-химических свойств поверхностных горизонтов почв и ТПО в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт»

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
1	E-10-01	*Sm*	1	140	47	14	29	210	120	13	480	25	0,29	2,2	1,9	650	1,5	32	0,43	13,7	0,09	4,4	4,0	3,8	65,9	29,4	4,7
2	E-10-02	*Sm*	1	150	51	15	29	95	93	12	370	4,4	0,21	1,9	1,2	560	1,2	24	0,39	12,2	0,08	4,2	7,5	3,7	70,3	25,9	3,8
3	E-10-03	*Sm*	1	140	47	14	28	190	98	16	380	5,4	0,24	2	1,9	590	1,2	30	0,44	13,9	0,08	4,2	7,8	2,9	64,1	29,4	6,5
4	E-10-04	*Sm*	1	140	48	12	23	210	110	10	370	19	0,29	1,9	1,6	580	2,8	27	0,27	11,5	0,08	4,0	7,7	4,5	58,9	35,6	5,5
5	E-10-05	*Sm*	1	140	46	12	27	90	130	12	650	6,7	0,22	2	1,6	700	1,5	30	0,34	12	0,09	3,9	7,9	3,7	67,2	28,1	4,7
6	E-10-06	*Sm*	1	140	53	14	32	76	91	11	320	3,5	0,21	2	1,1	540	1,4	23	0,36	13,1	0,09	4,4	7,6	5,2	69,1	26,9	4,0
7	E-10-07	*Sm*	1	150	53	16	28	420	120	13	480	17	2,3	41	2,2	670	5,5	29	0,4	12,6	0,10	4,8	7,7	4,6	71,2	25,5	3,3
8	E-10-08	*Sm*	1	150	48	14	26	550	310	16	490	18	1	3,5	3	670	1,6	30	0,36	14,3	0,08	4,4	7,8	3,0	69,9	27,0	3,1
9	E-10-09	*Ss*	1	130	130	14	35	83	130	14	360	5,7	0,37	4,8	1,6	940	3,4	65	0,34	13,6	0,10	4,8	7,6	3,7	59,1	36,9	4,0
10	E-10-10	*Ss*	1	150	43	11	21	75	120	9	400	8,7	0,25	2,1	1,2	680	1,7	29	0,23	12,4	0,08	3,8	7,6	3,6	65,2	29,9	4,9
11	E-10-11	*Ss*	1	150	49	13	27	61	150	10	390	3,7	0,7	6,5	1,7	560	1,9	44	0,28	13,1	0,09	4,2	7,2	6,3	69,9	26,8	3,3
12	E-10-12	*Ss*	1	150	40	12	26	49	94	8,7	500	2,8	0,22	1,6	1	730	6,2	25	0,19	14,3	0,08	4,6	7,0	5,5	75,1	22,3	2,6
13	E-10-13	*Ss*	1	160	55	11	26	35	96	9,1	370	3	0,24	2	1,2	610	1,2	98	0,32	12,8	0,08	4,3	6,3	5,1	73,8	23,6	2,6
14	E-10-14	*Sm*	1	140	57	13	30	43	49	7,9	310	2,7	0,19	1,8	0,87	540	1,2	19	0,27	12,3	0,11	4,1	7,1	5,2	75,9	20,3	3,8
15	E-10-15	*Sm*	1	160	29	14	21	220	110	12	460	23	0,3	2,3	2	650	1,5	35	0,54	13,7	0,08	4,6	7,8	2,5	70,3	26,4	3,3
16	E-10-16	*I*	1	130	40	13	25	270	130	13	420	13	0,31	1,8	2	510	1,6	72	0,32	11,6	0,07	3,7	7,6	3,6	68,3	27,9	3,8

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
17	E-10-17	*I*	1	130	51	13	27	240	120	10	330	11	0,38	2,3	1,4	550	2,6	49	0,36	12,4	0,10	4,0	6,8	7,5	66,6	29,3	4,1
18	E-10-18	*I*	1	140	36	13	22	290	96	10	490	10	0,29	1,8	1,2	570	1,9	32	0,2	12,6	0,08	4,2	7,5	2,7	70,1	26,9	3,0
19	E-10-19	*I*	4	120	41	11	24	230	74	15	420	25	0,19	1,8	2,2	550	1,5	43	0,34	13,3	0,08	3,8	7,4	3,9	67,4	29,1	3,5
20	E-10-20	*Sm*	1	130	52	12	27	74	210	8,5	380	3,4	0,37	2,3	1,1	640	1,5	40	0,32	13	0,10	4,0	7,2	7,1	59,1	35,9	5,0
21	E-11-001	*B*	1	130	53	16	28	29	77	8,6	350	1,6	0,25	2,2	0,7	660	1,5	19	0,24	15	0,10	4,9	7,0	9,7	71,7	24,8	3,5
22	E-11-002	*Ss*	1	140	72	17	29	28	74	9,2	360	1,9	0,24	2,3	0,8	690	1,3	24	0,49	15	0,09	5,1	6,3	7,6	71,7	25,0	3,3
23	E-11-003	*Ss*	1	150	58	31	37	29	81	12	390	2,7	0,22	2,8	2,1	690	2,1	21	0,79	17	0,10	6,5	6,3	5,6	57,8	35,6	6,6
24	E-11-004	*Ss*	1	160	70	21	37	43	87	9,5	580	1,9	0,2	2,1	0,93	620	1,6	20	0,47	16	0,08	5,7	8,7	5,1	68,6	25,7	5,7
25	E-11-005	*Ss*	1	150	62	24	36	29	87	9,2	390	1,7	0,23	2,5	0,93	720	1,8	20	0,55	17	0,10	6,1	8,0	0,5	51,2	41,7	7,1
26	E-11-006	*Ss*	1	150	58	25	34	28	76	9,8	420	2	0,57	2,6	1,2	700	5,7	21	0,81	17	0,10	5,8	8,2	0,4	60,5	33,0	6,5
27	E-11-007	*B*	3	220	52	26	32	43	99	4,8	910	1,4	0,22	2,3	0,53	880	12	18	0,18	20	0,12	7,4	6,9	5,1	77,5	19,7	2,8
28	E-11-008	*Ss*	3	170	69	21	36	27	97	7,9	520	1,3	0,29	2,7	0,76	800	1,4	19	0,26	17	0,12	6,3	7,6	6,2	56,2	38,1	5,7
29	E-11-009	*Ss*	1	190	79	21	36	30	84	5,5	610	1,2	0,2	2,3	0,58	730	1,7	17	0,2	18	0,10	6,7	7,7	2,8	67,6	28,0	4,4
30	E-11-010	*Ss*	1	160	65	20	34	35	94	6,3	450	1,5	0,28	2,6	0,7	690	1,6	23	0,26	18	0,11	6,0	6,9	6,1	56,7	37,9	5,4
31	E-11-011	*B*	4	200	95	26	45	34	99	4,8	640	1,4	0,23	2,6	0,53	790	2,2	17	0,19	19	0,11	7,2	7,2	5,4	66,5	29,2	4,4
32	E-11-012	*T*	1	170	52	27	38	52	97	10	460	2	0,26	2,9	1,2	650	2,5	22	0,64	18	0,11	6,7	7,6	3,6	63,7	30,7	5,6
33	E-11-013	*Ss*	1	180	80	22	40	34	99	7,1	530	1,6	0,27	2,6	0,69	740	6,8	19	0,24	18	0,12	6,7	7,1	5,7	62,3	32,6	5,1
34	E-11-014	*Ss*	4	200	55	22	32	49	110	10	380	1,3	0,31	3,2	1	600	2,2	22	0,26	18	0,13	7,2	8,2	2,9	57,6	36,5	5,8

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
35	E-11-015	*B*	4	240	70	26	37	61	110	17	580	2,4	0,31	3,4	1,8	570	8,2	23	0,21	17	0,12	8,2	7,2	3,1	83,5	13,9	2,6
36	E-11-016	*P*	4	140	52	17	28	36	92	8	360	1,6	0,36	3,2	1	610	530	24	0,26	15	0,10	5,0	7,6	2,5	54,8	38,7	6,5
37	E-11-017	*T*	1	150	52	16	27	120	100	9,4	380	3	0,67	14	1,3	590	4,8	29	0,57	15	0,08	5,2	8,1	4,1	66,9	28,8	4,3
38	E-11-018	*Ss*	4	250	63	27	34	53	100	9,8	350	1,8	0,24	3,2	0,93	530	4,9	19	0,24	15	0,12	8,1	7,8	3,7	84,9	13,5	1,6
39	E-11-019	*P*	1	140	53	16	26	34	95	7,4	310	2,1	0,3	3	0,86	560	14	19	0,28	15	0,10	5,2	6,8	10,3	76,2	21,1	2,8
40	E-11-020	*P*	1	150	62	19	37	48	100	12	290	2,4	0,33	3	1	600	2,5	25	0,37	17	0,11	6,2	7,2	8,7	53,5	40,3	6,2
41	E-11-022	*Ss*	1	150	51	15	26	74	120	7,6	400	2,9	0,29	2,8	1	590	120	28	0,2	14	0,09	5,4	7,6	4,1	84,7	13,3	2,1
42	E-11-024	*Ss*	1	180	58	20	32	60	120	11	330	2,3	0,35	3,5	1,2	650	13	32	0,28	17	0,12	6,8	6,9	4,7	73,8	22,9	3,3
43	E-11-025	*B*	1	170	51	19	26	29	120	11	320	1,9	0,34	3,2	1,3	580	1,9	33	0,42	16	0,11	6,7	6,4	5,7	83,1	14,9	2,0
44	E-11-026	*Ss*	1	160	51	18	29	51	95	14	400	2,3	0,26	3	1,2	550	51	36	0,23	16	0,08	5,5	7,9	3,4	84,3	13,7	2,0
45	E-11-027	*Ss*	1	140	50	16	27	57	95	10	310	3,5	0,26	2,9	1,2	570	2,1	26	0,25	15	0,09	5,2	6,6	4,9	78,6	18,6	2,8
46	E-11-028	*Ss*	1	150	58	15	28	50	170	9,7	410	2,9	0,3	2,8	1,1	870	3,2	56	0,24	15	0,09	5,3	8,3	3,8	75,2	21,4	3,4
47	E-11-029	*T*	1	140	54	16	32	89	88	9,5	400	8,5	0,27	3,4	1,1	540	2,3	35	0,24	14	0,09	5,5	8,5	2,9	65,4	29,2	5,5
48	E-11-030	*T*	1	150	53	16	29	44	90	8,9	360	2,7	0,24	2,7	1,3	580	2,3	160	0,27	14	0,10	5,5	8,4	3,2	71,2	24,7	4,1
49	E-11-031	*Ss*	4	150	59	16	28	39	98	8,1	310	2,1	0,29	2,7	0,89	640	2,2	23	0,27	14	0,10	5,5	8,4	6,3	61,2	33,7	5,1
50	E-11-032	*B*	1	150	57	18	26	38	100	6,5	380	2	0,3	2,8	0,76	620	2	20	0,23	14	0,12	5,6	6,4	8,2	53,0	41,0	6,0
51	E-11-033	*Ss*	4	150	46	15	24	91	120	12	400	7,9	0,28	2,6	1,5	650	2,2	30	0,27	14	0,09	5,6	8,2	2,3	70,1	26,3	3,7
52	E-11-034	*B*	4	210	57	21	26	60	98	12	390	1,7	0,26	2,9	1,4	550	2	24	0,21	15	0,11	7,3	7,1	4,3	77,0	19,7	3,3

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
53	E-11-035	*Ss*	4	160	61	16	27	27	83	8,8	510	1,7	0,2	2,5	0,86	640	1,7	18	0,2	14	0,09	5,4	8,4	2,0	68,6	26,2	5,2
54	E-11-036	*Ss*	4	150	51	18	30	53	95	9,5	500	2,1	0,23	2,6	1	600	1,8	24	0,24	14	0,08	5,4	8,6	2,7	72,2	23,8	3,9
55	E-11-037	*Ss*	1	160	57	18	29	69	110	9	360	2,6	0,7	15	9,1	630	2,2	67	0,24	14	0,10	5,9	7,8	2,8	71,6	25,1	3,4
56	E-11-038	*Ss*	1	13	150	59	16	28	43	18	78	16	0,1	0,25	2,8	3,7	0,75	0,45	22	1,7	0,76	0,1	5,3	2,2	65,8	29,6	4,6
57	E-11-039	*T*	1	180	51	19	27	85	100	8,8	390	2,5	0,24	2,8	1,3	570	3,4	26	0,25	16	0,11	6,7	8,3	2,0	73,9	22,6	3,5
58	E-11-040	*Sm*	1	150	54	16	32	73	94	12	390	3,7	0,22	2,6	1,1	620	2	30	0,3	15	0,09	5,6	8,4	1,8	67,7	27,6	4,7
59	E-11-041	*Sm*	1	170	66	17	31	45	110	10	340	2	0,99	2,9	1	590	2,4	26	0,28	15	0,11	6,3	8,3	5,0	55,1	37,3	7,5
60	E-11-042	*B*	1	170	50	16	24	36	74	9,8	330	1,7	0,19	2,8	0,95	510	3,1	21	0,25	16	0,09	6,3	7,3	2,5	77,0	20,1	2,9
61	E-11-043	*B*	1	77	23	6	9	48	48	8,3	150	6,7	0,18	2,1	5,2	730	2	48	0,97	16	0,04	3,8	6,5	2,5	81,0	16,7	2,3
62	E-11-044	*Sm*	1	140	52	15	27	71	110	12	460	4,4	1,6	4,3	1,5	590	6,8	26	5,3	14	0,08	5,0	8,6	3,0	78,5	18,0	3,5
63	E-11-045	*Sm*	1	160	59	17	33	91	180	11	390	4,8	0,39	3,6	1,7	740	2,1	58	0,4	16	0,10	5,9	8,0	4,5	53,3	39,2	7,5
64	E-11-046	*B*	3	170	53	15	24	82	77	30	320	3,2	0,29	4	7,4	920	4,7	29	0,57	16	0,08	5,5	6,2	6,0	66,5	29,1	4,4
65	E-11-047	*B*	3	160	40	12	19	42	70	12	420	4,2	0,26	3,4	1,2	690	3	22	0,37	14	0,07	5,2	7,1	8,5	70,0	26,2	3,8
66	E-11-048	*Ss*	3	150	61	17	49	53	170	12	380	2,5	0,29	2,7	1,1	650	2,7	28	0,32	15	0,10	5,5	8,1	2,7	67,5	28,0	4,4
67	E-11-049	*B*	3	110	43	11	19	36	76	8,8	280	2,9	0,2	2,5	0,69	680	1,9	26	0,23	14	0,06	4,4	7,1	5,3	71,8	24,4	3,8
68	E-11-050	*B*	2	160	54	16	27	43	81	12	320	4,4	0,25	2,7	1,2	680	2,7	22	0,33	15	0,09	5,3	6,4	7,1	68,1	28,0	3,9
69	E-11-051	*Ss*	1	140	58	15	29	48	76	11	310	2,3	0,26	3,5	1	610	2	23	0,4	15	0,10	5,6	8,2	5,0	66,7	28,8	4,5
70	E-11-052	*B*	2	170	55	17	26	58	110	14	330	3,3	0,3	3,7	1,2	520	4,1	29	0,32	15	0,11	5,7	6,2	5,7	69,2	27,0	3,8

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
71	E-11-053	*Ss*	1	180	63	21	37	69	110	41	390	8	0,52	4,7	1,8	580	17	36	0,89	17	0,10	5,5	7,7	3,4	61,3	33,5	5,2
72	E-11-054	*I*	1	150	46	16	26	82	110	21	430	5,7	0,33	3,6	1,3	590	7,9	25	0,32	14	0,10	5,5	8,7	2,5	74,9	21,0	4,2
73	E-11-055	*T*	1	140	50	16	30	71	89	14	460	4,3	0,27	3,1	1,4	540	3,4	27	0,45	14	0,09	5,1	7,8	2,0	62,8	30,7	6,5
74	E-11-056	*P*	1	150	51	15	25	34	67	9	490	2,7	0,21	3,3	1	590	2,3	21	0,35	14	0,08	4,8	8,3	2,5	74,2	21,4	4,4
75	E-11-058	*T*	1	150	52	16	31	72	92	13	400	3,5	0,26	3,1	1,3	580	2,8	31	0,42	15	0,09	5,3	8,3	3,2	62,1	32,0	5,9
76	E-11-059	*Ss*	1	150	60	18	29	35	80	11	310	1,7	0,25	3,1	0,87	630	1,7	22	0,41	16	0,10	5,3	8,2	4,5	49,7	42,5	7,8
77	E-11-060	*T*	1	160	49	16	25	170	140	12	480	13	0,34	3,7	1,4	640	4,3	42	0,36	15	0,09	5,3	8,2	3,9	74,7	21,6	3,7
78	E-11-061	*T*	1	150	52	17	29	150	100	10	400	27	0,32	3,5	1,3	550	3,8	36	0,32	14	0,09	5,2	8,0	4,0	69,8	25,9	4,3
79	E-11-062	*P*	1	150	59	17	30	44	85	8,3	300	2,8	0,3	3,4	0,85	610	2,6	22	0,43	15	0,10	5,4	7,2	7,7	47,2	45,2	7,6
80	E-11-063	*P*	1	150	58	16	26	51	84	8,7	340	4,3	0,28	3,6	0,91	630	5,2	22	0,33	15	0,10	5,3	7,1	6,6	64,6	30,3	5,1
81	E-11-064	*P*	1	170	63	17	25	43	89	8,2	350	3,5	0,28	3,4	0,88	660	7,8	22	0,35	16	0,10	5,5	6,8	5,7	57,0	36,8	6,2
82	E-11-065	*T*	1	140	46	15	28	200	110	10	450	9,6	0,31	3,2	1,4	650	2,4	34	0,36	15	0,08	4,9	7,9	3,5	61,4	32,7	5,9
83	E-11-066	*P*	4	140	55	16	26	220	110	20	290	6,7	0,33	3,3	1,5	630	2,6	31	0,46	14	0,10	5,1	7,2	6,5	59,6	35,4	4,9
84	E-11-068	*Ss*	2	150	61	16	28	41	83	8,4	280	2,9	0,26	3,1	0,79	620	4,1	18	0,27	15	0,11	5,4	6,7	6,2	60,6	34,5	4,9
85	E-11-069	*P*	2	150	46	15	26	63	81	10	300	3,3	0,27	3,2	0,88	540	3,7	20	0,26	15	0,10	5,2	8,1	5,1	74,3	23,3	2,4
86	E-11-070	*P*	2	160	53	15	24	36	71	9,7	290	3,5	0,22	3,3	0,96	590	2,5	19	0,24	16	0,09	5,9	7,0	3,3	75,8	21,1	3,1
87	E-11-071	*P*	2	150	42	10	18	34	50	8,3	180	3,3	0,19	2,9	0,81	450	2,2	15	0,26	18	0,06	4,5	6,8	3,4	71,8	24,5	3,7
88	E-11-072	*B*	4	160	48	16	24	27	73	8,7	240	1,9	0,23	3,6	0,88	500	16	18	0,25	16	0,10	6,1	7,3	3,3	71,6	24,8	3,5

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
89	E-11-073	*Ss*	4	140	49	14	26	72	110	6,6	260	3,3	0,3	3,4	0,86	500	3	31	0,23	12	0,10	5,0	8,0	3,1	75,0	21,4	3,6
90	E-11-074	*P*	1	120	52	15	27	29	95	8,6	330	2,3	5,6	3,1	0,79	600	2,8	47	0,45	13	0,10	4,5	7,7	3,2	59,0	35,6	5,4
91	E-11-075	*Ss*	1	140	61	16	27	31	82	7,8	260	2,2	0,3	3,6	0,83	580	4,4	20	0,3	14	0,12	5,3	6,4	9,4	61,2	34,2	4,6
92	E-11-076	*B*	4	120	36	13	25	45	74	4,1	570	2,4	0,24	1,9	0,6	370	1,3	16	0,17	8,9	0,11	3,3	6,2	18,1	80,5	17,4	2,1
93	E-11-077	*B*	4	110	25	9	18	31	160	7,1	240	2	0,32	4,6	1,4	460	1,9	23	0,31	13	0,10	3,7	6,4	6,1	76,0	21,3	2,7
94	E-11-078	*P*	1	140	49	14	27	33	78	7,6	310	1,5	0,28	3	0,95	480	1,9	21	0,29	12	0,10	4,1	6,3	6,1	63,2	32,2	4,5
95	E-11-079	*Ss*	1	150	47	16	28	55	150	7,5	380	2,4	0,44	3,6	1,1	500	1,8	33	0,23	13	0,10	4,5	7,7	3,9	74,3	22,6	3,0
96	E-11-080	*P*	1	170	56	15	33	43	150	11	450	2,6	0,31	5,2	1,5	550	2,1	24	0,34	14	0,10	4,6	8,2	3,7	70,8	25,4	3,8
97	E-11-081	*P*	1	150	39	14	23	49	120	7,1	390	4	0,4	2,9	1	540	1,7	25	0,23	12	0,11	4,4	6,6	7,7	71,5	25,3	3,2
98	E-11-082	*P*	1	150	53	15	30	38	96	8,8	280	1,4	0,25	2,6	0,79	550	2	23	0,31	13	0,11	4,6	7,0	6,0	63,0	32,2	4,8
99	E-11-083	*B*	1	160	56	16	32	35	85	8,9	410	1,5	0,28	3,3	1	550	2,1	25	0,29	14	0,11	4,7	8,1	4,8	58,4	36,4	5,2
100	E-11-084	*P*	4	140	24	10	17	55	72	6,9	420	2,7	0,21	2,6	0,91	510	1,7	17	0,21	13	0,10	4,7	7,1	5,2	62,6	32,5	4,8
101	E-11-085	*P*	1	160	53	14	29	34	74	8,9	340	2	0,24	3,1	1,1	520	2,7	21	0,29	13	0,10	4,4	7,1	5,7	65,8	30,0	4,2
102	E-11-086	*P*	1	140	54	14	34	31	610	9,4	300	1,7	0,24	2,9	0,86	540	2,2	22	0,31	13	0,09	4,9	8,1	5,5	81,3	16,6	2,1
103	E-11-087	*Ss*	1	150	48	13	28	41	91	8,3	370	2,3	0,31	3,2	1,1	500	1,9	22	0,27	13	0,10	4,2	6,7	5,2	60,0	34,5	5,5
104	E-11-088	*P*	4	180	44	16	28	50	86	11	410	1,6	0,26	4,4	1,2	470	1,9	22	0,23	6,9	0,10	5,2	7,0	3,7	65,9	30,1	4,0
105	E-11-089	*P*	2	160	40	14	24	32	73	10	360	1,6	0,25	4,3	1,2	460	1,9	24	0,21	7,3	0,09	4,5	6,6	0,4	73,6	23,3	3,1
106	E-11-090	*P*	4	160	59	16	34	37	88	8,9	330	1,6	0,3	3,3	1	500	1,9	24	0,27	6,4	0,10	4,6	6,8	6,5	62,7	32,7	4,6

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
107	E-11-091	*P*	1	140	49	13	28	29	71	9	270	1,3	0,21	2,5	0,79	500	1,8	20	0,27	6	0,09	3,9	7,2	8,2	63,1	32,4	4,5
108	E-11-092	*P*	1	130	52	14	32	37	92	8	230	1,1	0,3	2,3	0,72	490	1,8	22	0,29	6	0,11	4,0	7,4	9,6	49,8	44,0	6,2
109	E-11-093	*B*	1	130	47	12	28	32	68	7,5	250	1,5	0,18	2,2	0,76	430	1,7	19	0,23	5,4	0,09	3,7	7,5	7,7	91,1	7,9	1,0
110	E-11-094	*B*	4	200	44	18	26	50	88	7,8	300	1,1	0,22	2,4	0,88	400	1,4	25	0,19	6,2	0,11	5,5	7,0	3,3	68,2	27,8	4,0
111	E-11-095	*P*	4	180	41	16	31	62	84	8,1	320	4,6	0,23	2,5	0,85	390	1,6	19	0,19	5,8	0,10	5,0	6,4	4,1	74,8	22,1	3,1
112	E-11-096	*B*	4	160	46	15	27	38	130	8,1	250	1,6	0,23	2,9	0,84	430	1,9	19	0,23	6	0,10	4,4	7,2	3,9	70,8	25,7	3,5
113	E-11-097	*P*	1	120	50	16	33	36	91	7,1	290	1,3	0,26	2,2	0,69	440	1,8	19	0,25	5,4	0,13	3,8	8,2	6,6	47,1	45,4	7,5
114	E-11-098	*B*	1	150	59	15	31	31	86	8,1	280	1,4	0,27	2,8	0,72	520	1,9	20	0,27	6,6	0,11	4,3	6,8	5,5	51,0	42,5	6,5
115	E-11-099	*P*	4	160	59	16	32	33	78	9	290	1,3	0,23	2,4	0,81	500	1,8	19	0,36	6,5	0,11	4,5	6,9	4,9	53,6	40,3	6,1
116	E-11-100	*P*	4	160	61	15	32	25	70	8,9	300	0,97	0,19	2,4	0,72	480	1,8	19	0,25	6,5	0,10	4,4	7,0	5,2	54,0	40,1	6,0
117	E-11-101	*B*	4	140	67	15	32	32	88	6,1	250	1,3	0,25	3,2	0,71	450	1,9	18	0,25	6,2	0,10	4,2	6,5	8,8	60,1	34,9	5,0
118	E-11-102	*P*	4	200	45	16	26	60	150	9,2	350	2,7	0,3	4,7	0,92	520	1,8	24	0,21	6,7	0,11	5,4	7,4	3,8	77,0	19,9	3,0
119	E-11-103	*P*	4	170	51	16	29	46	93	8,4	260	1,2	0,3	2,6	0,83	460	1,8	26	0,24	6	0,11	4,9	7,4	4,4	59,2	35,3	5,6
120	E-11-104	*B*	4	230	73	19	39	46	120	6,8	550	1,3	0,17	2,3	0,79	480	1,3	16	0,17	6,9	0,10	6,4	7,6	4,7	84,1	14,2	1,7
121	E-11-105	*Sm*	1	130	44	12	27	35	98	8,1	280	1,8	0,28	2,3	0,97	460	2	20	0,24	5,6	0,10	3,8	8,1	6,9	68,2	27,9	4,0
122	E-11-106	*Sm*	1	170	67	19	35	92	100	11	370	7,5	0,33	4,9	1,3	740	3,1	23	0,31	17	0,11	6,3	7,8	3,8	55,1	38,4	6,6
123	E-11-107	*T*	1	140	45	14	26	48	88	7,1	350	2,8	0,22	2,6	1	460	2,3	39	0,25	13	0,08	4,1	8,1	2,7	71,0	24,7	4,3
124	E-11-108	*Ss*	1	130	46	13	26	49	78	7,7	260	2,8	0,23	2,3	0,76	440	1,8	20	0,25	12	0,10	3,9	7,2	7,0	54,4	39,7	5,9

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
125	E-11-109	*Ss*	1	150	50	14	26	51	100	7,8	290	2,5	0,29	2,9	0,9	480	2,9	25	0,25	13	0,11	4,4	6,4	6,1	65,0	30,6	4,4
126	E-11-110	*P*	4	250	93	22	43	87	100	8,4	520	3,2	0,24	3,2	0,77	450	1,3	18	0,13	14	0,12	6,3	7,4	4,7	84,2	14,1	1,7
127	E-11-111	*I*	4	150	42	13	24	130	70	9,9	280	28	0,27	1,8	1,2	540	3	28	0,33	14	0,09	4,5	6,0	4,3	95,6	3,8	0,6
128	E-11-112	*I*	4	220	48	16	25	55	71	8,6	280	3,9	0,23	3	0,86	420	2	23	0,23	12	0,11	6,3	6,7	3,3	72,4	24,4	3,2
129	E-11-113	*P*	4	130	47	15	32	40	66	8,7	410	1,9	0,18	2,3	0,96	440	1,8	19	0,25	12	0,08	3,8	7,1	3,5	79,5	17,9	2,6
130	E-11-114	*P*	4	130	24	11	17	150	76	10	320	13	0,3	2,2	1,3	460	2,7	28	0,32	13	0,09	4,0	7,9	5,9	84,1	14,0	1,9
131	E-11-115	*P*	4	110	25	9,8	16	210	110	11	280	25	0,48	2,8	1,4	590	3,5	41	0,47	14	0,11	3,8	5,3	6,0	81,9	15,9	2,2
132	E-11-116	*P*	4	140	47	12	25	74	66	8,3	270	5	0,2	2,3	0,94	450	2	20	0,26	12	0,09	4,1	7,1	3,8	70,7	25,8	3,5
133	E-11-117	*Ss*	1	190	51	16	28	69	82	14	260	10	0,25	3,2	1,1	470	2,3	23	0,27	14	0,11	5,7	6,5	4,9	64,3	30,9	4,8
134	E-11-118	*Ss*	1	150	310	14	28	43	86	8	370	1,7	0,23	2,4	0,96	470	2,1	21	0,24	13	0,09	4,1	8,4	5,1	62,5	32,3	5,3
135	E-11-119	*I*	1	180	56	20	34	27	78	7,6	320	1,3	0,21	2,9	0,66	680	2,2	21	0,27	18	0,11	6,2	7,8	6,9	75,2	21,6	3,3
136	E-11-120	*Ss*	1	150	48	14	29	43	71	7,7	360	2,3	0,18	2,2	0,75	460	1,6	21	0,31	12	0,08	4,4	8,3	2,8	64,4	29,9	5,6
137	E-11-121	*I*	1	140	53	14	30	53	78	10	350	4,5	0,25	3,1	1	600	2,1	24	0,31	14	0,10	4,9	8,4	3,2	67,5	28,1	4,4
138	E-11-122	*T*	1	180	47	20	39	110	120	8,4	440	5,3	0,37	3,1	1,1	660	5,4	29	0,27	19	0,09	6,3	8,1	3,3	61,1	32,6	6,3
139	E-11-123	*T*	1	130	49	16	36	41	86	10	460	2,4	0,22	3,1	1	520	3,5	19	0,27	14	0,09	4,6	8,4	4,1	61,6	31,8	6,6
140	E-11-124	*B*	4	190	84	20	46	41	100	5,8	580	2,5	0,21	2,8	1,3	710	1,1	17	0,23	16,2	0,11	6,2	7,1	6,2	77,8	19,4	2,8
141	E-11-125	*B*	4	150	45	14	23	48	100	8,3	360	3,1	0,28	2,7	1	570	2,7	26	0,24	15	0,12	5,1	7,6	4,1	69,7	26,1	4,2
142	E-11-126	*P*	1	100	38	12	22	140	84	11	370	10	0,29	2,3	1,3	460	2,7	21	0,31	11	0,09	3,7	7,7	7,4	70,6	26,0	3,3

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
143	E-11-127	*P*	1	130	42	14	28	220	79	13	500	18	0,24	2,6	1,6	530	3,4	23	0,31	13	0,08	4,4	8,6	1,4	76,2	19,7	4,1
144	E-11-128	*I*	1	180	43	18	30	140	98	9,4	410	8,7	0,34	3,1	1	680	4,5	28	0,28	19	0,10	6,1	8,1	3,7	63,6	31,2	5,2
145	E-11-129	*I*	1	74	67	9,7	31	660	770	5,4	270	130	1,6	9,2	3,4	570	7,9	84	3	7,6	0,07	4,0	6,7	3,6	69,3	27,1	3,6
146	E-11-130	*P*	1	140	45	14	25	480	82	16	500	42	0,32	2,4	2,3	510	2	23	0,43	13	0,08	4,2	7,7	2,4	74,6	21,4	4,0
147	E-11-131	*P*	1	53	20	7,9	20	61	42	11	880	12	0,18	1,3	0,76	260	1,2	10	0,15	5,5	0,06	2,5	7,9	2,0	68,2	27,5	4,3
148	E-11-132	*I*	1	160	52	15	30	74	90	9,7	340	5,1	0,21	2,6	1	510	1,6	21	0,21	13	0,10	4,6	8,4	1,9	68,2	27,0	4,9
149	E-11-133	*P*	1	140	44	14	24	250	63	12	430	21	0,21	2,2	1,5	500	2,2	21	0,32	12	0,08	4,0	8,5	2,6	78,5	18,2	3,3
150	E-11-134	*I*	5	97	70	16	40	110	52	6	710	32	0,19	1,5	0,75	370	1,9	15	0,27	18	0,05	3,2	8,2	2,3	75,6	21,1	3,3
151	E-11-135	*P*	5	200	55	18	31	60	96	6,7	500	3,5	0,22	2,5	0,67	190	1,5	19	0,2	14	0,11	5,6	7,0	3,8	81,4	16,5	2,1
152	E-11-136	*B*	5	210	43	17	28	86	110	7	470	3	0,26	2,8	0,88	450	1,7	21	0,2	14	0,11	6,1	5,6	6,2	85,2	13,2	1,6
153	E-11-137	*P*	4	180	54	15	29	50	81	8,5	280	1,6	0,25	3,1	0,88	460	1,8	21	0,25	14	0,10	5,0	7,5	3,2	61,3	33,8	4,8
154	E-11-138	*P*	4	210	57	16	31	55	87	7,5	410	1,7	0,21	2,3	0,78	500	1,5	19	0,21	13	0,10	5,5	7,0	4,1	80,4	17,3	2,3
155	E-11-139	*P*	1	190	53	19	34	63	97	7,5	430	1,9	0,23	2,6	0,75	440	1,4	19	0,17	13	0,11	5,2	7,9	3,7	77,9	19,2	2,8
156	E-11-140	*P*	1	160	63	16	32	37	95	10	310	1,8	0,25	2,5	0,79	530	1,9	20	0,27	14	0,12	4,6	6,8	5,0	58,0	36,4	5,6
157	E-11-141	*B*	5	180	75	15	37	36	87	19	340	1,2	0,23	2,5	0,75	540	1,6	20	0,23	14	0,12	4,9	6,9	3,3	68,5	27,6	3,8
158	E-11-142	*P*	1	170	59	14	29	38	78	12	330	3,6	0,21	2,3	0,68	480	1,5	18	0,21	14	0,11	4,8	6,7	3,6	72,3	24,4	3,2
159	E-11-143	*P*	1	160	59	14	29	46	81	8,8	280	3	0,23	2,4	0,79	510	2,1	20	0,27	14	0,11	4,4	6,8	4,9	61,0	34,2	4,9
160	E-11-144	*B*	5	140	28	11	20	48	87	6,3	430	3,8	0,22	2,1	0,72	610	1,2	20	0,24	14	0,12	3,9	6,0	4,9	81,7	16,2	2,1

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
161	E-11-145	*I*	1	160	60	13	29	51	82	8,5	330	4,3	0,22	2,6	0,83	510	1,8	18	0,23	13	0,10	4,4	7,2	3,7	73,2	23,3	3,5
162	E-11-146	*I*	1	180	80	18	45	180	140	11	380	16	0,5	5,7	1,4	520	2,2	32	0,26	13	0,11	5,2	7,9	2,8	75,1	21,6	3,3
163	E-11-147	*I*	1	140	60	14	29	82	100	7,5	310	3,1	0,32	2,9	1,8	700	1,6	23	0,31	14	0,11	4,8	6,9	7,5	63,3	32,2	4,5
164	E-11-148	*I*	4	150	69	14	34	51	99	7,2	310	1,9	0,27	3,2	1,3	690	1,4	21	0,31	14,7	0,11	5,1	7,1	5,3	60,3	34,8	4,8
165	E-11-149	*I*	4	160	84	15	34	400	270	10	350	12	1,8	20	5,5	770	7,8	190	0,36	14,9	0,12	5,4	7,2	3,7	66,3	29,3	4,4
166	E-11-150	*I*	4	210	63	19	33	130	120	11	580	5,4	0,3	3,6	1,3	760	1,5	35	0,32	17,8	0,12	6,7	6,8	2,9	78,9	18,7	2,4
167	E-11-151	*P*	4	140	60	14	30	140	96	11	300	7	0,29	3	1,4	700	1,9	23	0,33	15	0,11	4,9	6,4	5,4	53,8	39,9	6,3
168	E-11-152	*I*	4	170	55	12	27	67	64	8,7	450	3,5	0,2	3,1	1	700	1,5	20	0,28	16,2	0,08	5,0	7,2	2,7	68,7	27,4	3,9
169	E-11-153	*I*	4	120	41	12	20	280	98	22	340	27	0,34	3	4,1	750	2,3	44	0,46	14,5	0,09	4,1	6,6	6,4	72,0	25,0	3,0
170	E-11-154	*B*	4	130	49	12	26	570	96	11	380	40	0,34	3,1	2,1	880	3,6	30	0,64	16,6	0,09	4,1	6,2	4,9	82,5	15,4	2,1
171	E-11-155	*P*	2	130	44	13	25	910	99	9,9	390	23	0,34	2,8	1,5	730	3,1	24	0,57	15,3	0,08	4,7	6,8	4,9	87,8	10,8	1,4
172	E-11-156	*P*	4	130	64	13	31	230	110	7,7	280	6,1	0,25	3,1	1,2	640	2,3	22	0,34	14	0,10	4,4	6,8	9,3	67,7	28,8	3,5
173	E-11-157	*I*	4	110	49	12	25	230	78	11	240	9,2	0,31	2,7	1,5	600	1,6	21	0,3	11,5	0,11	3,8	6,2	12,4	64,5	31,3	4,2
174	E-11-158	*I*	4	130	63	19	34	1400	130	13	260	13	0,67	3	1,9	660	2,2	24	0,38	13,5	0,13	4,5	5,8	8,2	60,5	34,6	4,8
175	E-11-159	*I*	4	140	62	14	31	530	85	15	280	13	0,31	3,3	2,4	690	2,9	28	0,53	14,8	0,10	4,6	7,1	4,8	64,0	31,5	4,4
176	E-11-160	*P*	2	140	66	14	31	90	91	7,4	280	3,9	0,29	3,4	1,4	750	2	33	0,43	14,9	0,11	4,7	6,6	6,0	80,9	16,7	2,4
177	E-11-161	*P*	5	130	60	15	31	110	91	8,1	280	4,2	0,3	3,1	1,3	690	1,7	23	0,34	13,9	0,12	4,6	8,1	5,5	55,4	39,1	5,6
178	E-11-162	*P*	4	150	60	16	32	340	120	12	340	11	0,42	3	1,8	700	2,6	30	0,51	14,7	0,12	5,0	6,5	5,7	66,6	29,3	4,1

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
179	E-11-163	*P*	4	130	60	14	30	75	82	6,8	300	3,6	0,25	2,9	1,2	720	1,9	23	0,36	14,2	0,10	4,5	6,8	4,0	58,4	36,0	5,6
180	E-11-164	*P*	4	180	61	15	29	99	81	8	340	3,9	0,26	3,1	1,1	670	1,6	21	0,27	14,2	0,11	5,5	6,8	3,3	73,1	23,4	3,5
181	E-11-165	*P*	4	160	68	15	32	55	85	8,4	340	1,9	0,27	2,9	1,1	740	1,5	22	0,28	14,6	0,11	5,1	6,9	4,3	58,9	35,7	5,4
182	E-11-166	*P*	4	160	67	16	33	760	430	33	330	26	2	5,7	3,3	700	2,5	51	1,5	14,6	0,11	5,3	8,0	4,7	53,9	40,0	6,1
183	E-11-167	*P*	4	160	74	16	35	60	91	7,6	280	2,3	0,26	2,8	1	680	1,4	20	0,26	15,2	0,12	5,2	7,1	5,0	61,7	33,6	4,7
184	E-11-168	*P*	4	140	52	14	26	98	79	7,7	350	2,8	0,22	2,7	0,99	770	2,4	22	0,24	15,2	0,09	5,0	6,8	3,7	80,8	16,9	2,3
185	E-11-169	*P*	1	150	63	13	27	100	87	13	340	6,1	0,27	2,7	1,7	710	1,9	25	0,38	14,5	0,10	4,6	6,2	6,2	70,5	25,9	3,5
186	E-11-170	*I*	1	140	38	15	24	150	99	17	350	8,7	0,41	2,3	1,3	450	5,6	29	0,39	14	0,10	4,7	7,4	5,3	81,7	16,2	2,1
187	E-11-170	*I*	1	190	62	31	48	77	96	110	740	23	0,45	5,1	1,9	590	39	24	1,5	18	0,15	8,3	7,6	4,3	66,9	28,8	4,2
188	E-11-171	*I*	1	160	49	17	33	78	95	13	400	4,7	0,22	2,9	1,1	630	13	19	0,27	17	0,09	5,6	8,1	4,4	65,8	29,1	5,1
189	E-11-172	*I*	1	150	51	17	29	160	84	26	340	12	0,29	2,7	1,1	500	17	19	0,3	15	0,10	5,7	7,6	9,0	78,0	19,4	2,6
190	E-11-173	*I*	4	130	52	11	25	93	73	8,2	260	8,4	0,22	2,7	1,1	770	1,8	59	0,29	15	0,08	4,3	7,8	5,1	71,4	25,6	3,0
191	E-11-174	*T*	1	130	40	13	25	180	76	18	420	28	0,22	2,5	2,1	620	3,3	25	0,35	14	0,08	4,5	8,0	2,6	72,4	23,7	4,0
192	E-11-175	*I*	4	130	62	13	27	640	90	15	290	19	0,31	3	2	680	2,6	23	0,38	13,6	0,11	4,6	7,4	9,6	69,5	27,2	3,3
193	E-11-176	*I*	4	140	65	15	36	340	81	11	390	8,9	0,24	2,9	1,5	610	1,9	21	0,28	14,3	0,10	4,6	8,4	4,1	64,7	30,8	4,5
194	E-11-177	*I*	4	160	54	16	28	910	130	17	490	69	0,39	2,8	2,6	660	2,7	29	0,35	14,8	0,11	5,2	8,0	4,5	76,7	19,9	3,4
195	E-11-178	*Sm*	1	170	44	16	26	160	170	7,5	450	21	0,33	3,8	1,2	820	2,5	69	0,28	17	0,08	5,8	7,8	2,5	82,0	15,5	2,6
196	E-11-179	*P*	5	160	42	15	23	140	77	6,8	350	11	0,23	2,6	0,8	690	2,5	22	0,22	16	0,09	5,1	8,1	6,0	75,7	21,1	3,2

№	Точка	Функци-ональная зона	Почво-образу-ющая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)																Физико-химические свойста поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
197	E-11-180	*I*	4	180	58	16	29	810	89	15	470	31	0,28	2,7	2	670	1,8	20	0,31	15,2	0,10	5,7	6,8	3,3	72,5	24,1	3,4
198	E-11-181	*B*	5	180	57	17	28	600	97	11	400	17	0,26	3,3	1,9	610	2	20	0,31	16,3	0,11	5,9	6,7	4,9	75,5	21,5	2,9
199	E-11-182	*I*	4	130	62	13	32	390	92	15	270	13	0,22	2,6	1,5	600	2,2	2	0,32	13,7	0,09	4,4	5,8	7,9	63,5	31,6	4,9
200	E-11-183	*P*	4	120	60	13	28	94	70	8	260	4	0,21	2,6	0,92	640	1,4	23	0,29	13,9	0,09	4,2	7,1	6,4	54,4	39,2	6,4
201	E-11-184	*P*	4	140	63	13	30	49	73	7,5	330	2,2	0,22	2,8	0,99	660	1,8	18	0,31	14,7	0,10	4,6	7,1	4,7	62,1	33,6	4,3
202	E-11-185	*P*	4	130	57	12	24	89	73	6,6	320	3,6	0,26	3,2	0,91	670	1,6	19	0,28	13,9	0,10	4,1	6,8	7,5	73,2	23,7	3,1
203	E-11-186	*P*	4	110	41	10	20	140	69	6,5	320	4,9	0,25	3	1	690	1,5	19	0,23	12,9	0,09	3,7	6,5	6,1	73,5	23,4	3,1
204	E-11-187	*P*	4	150	61	13	28	93	81	8,7	330	6,9	0,23	3,1	1,1	710	1,6	21	0,28	15	0,10	4,9	6,5	4,6	73,7	23,2	3,1
205	E-11-188	*I*	1	130	54	14	29	400	97	10	380	8,7	0,28	2,9	1,2	700	1,6	23	0,29	14,2	0,10	4,3	8,2	3,9	41,4	53,6	5,0
206	E-11-189	*I*	4	190	57	20	35	1100	110	15	510	25	0,29	2,4	2,7	540	2,3	18	0,3	16,3	0,14	6,1	6,1	6,6	67,9	30,7	1,3
207	E-11-190	*I*	1	120	53	12	24	230	88	8,2	290	9	0,26	2,5	1,1	610	1,6	21	0,25	12,9	0,10	4,2	6,7	8,1	66,6	29,8	3,7
208	E-11-191	*I*	1	130	45	13	25	68	81	11	470	8,5	0,21	2,7	1,2	550	4,9	20	0,31	14	0,09	4,2	8,2	2,2	71,7	23,6	4,8
209	E-11-195	*T*	5	140	45	13	27	120	79	9,1	410	14	0,23	2,6	0,95	580	2,2	19	0,25	13	0,08	4,6	8,0	3,0	54,6	40,6	4,7
210	E-11-196	*P*	1	140	51	15	32	260	90	13	410	17	0,29	2,1	1,4	540	2,1	24	0,38	13	0,09	4,0	8,0	3,7	65,3	29,2	5,5
211	E-11-197	*P*	1	170	59	14	32	76	88	10	360	4,6	0,25	2,5	0,95	580	2	23	0,3	15	0,11	5,1	7,1	6,0	68,6	27,4	4,0
212	E-11-198	*T*	1	150	51	13	29	57	90	7,8	280	3,5	0,27	2,3	0,76	530	1,8	19	0,26	13	0,11	4,4	6,6	6,5	37,4	58,2	4,3
213	E-11-199	*B*	5	140	34	15	26	47	67	6,1	410	2,8	0,17	2,4	0,56	720	2,7	15	0,16	18	0,08	4,9	8,0	2,3	68,6	27,2	4,2
214	E-11-201	*I*	4	130	42	34	34	42000	500	350	420	870	2,7	2,6	48	230	2,8	52	3,2	13,9	0,06	12,7	8,3	2,7	57,6	38,9	3,5

№	Точка	Функциональная зона	Почвообразующая порода	Содержание тяжелых металлов и металлоидов в поверхностных слоях почв (мг/кг)															Физико-химические свойства поверхностных слоев почв							
				V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	pH	Гумус	Физ. песок	Физ. глина	Ил
215	E-11-202	*I*	4	110	40	12	27	530	80	13	450	21	0,26	2,3	1,7	800	2,5	28	0,33	15	0,07	4,1	8,2	4,9	74,5	23,7	1,8
216	E-11-203	*I*	1	100	24	13	18	390	95	11	470	51	0,23	2,5	1,6	660	3,8	34	0,31	13	0,06	3,9	8,3	4,9	49,5	47,5	3,0
217	E-11-204	*I*	4	66	20	5,5	12	340	40	13	140	16	0,19	2,3	2,1	310	1,4	15	0,28	5,8	0,04	2,3	8,2	4,9	88,4	9,8	1,8
218	E-11-205	*I*	4	150	56	16	31	1300	100	15	480	30	0,29	2,5	2,2	630	2,2	21	0,37	15	0,09	4,8	8,3	2,5	65,9	30,7	3,4
219	E-11-206	*I*	4	140	65	16	33	290	82	9	310	10	0,27	2,9	1,2	660	2,6	26	0,4	15,3	0,11	4,8	7,4	4,2	30,2	62,7	7,1
220	E-11-207	*I*	4	130	40	15	26	1300	130	23	380	44	0,48	3,1	3,8	720	5,2	52	0,72	15,2	0,09	4,4	8,5	2,2	59,8	36,9	3,3
221	E-11-208	*I*	4	170	36	16	26	2000	120	27	410	42	0,3	2,8	3,7	670	3,2	23	0,42	19	0,08	6,1	8,5	1,5	70,9	26,8	2,3
222	E-11-209	*I*	4	110	35	14	19	9100	180	85	340	180	0,86	3,4	15	790	4,6	45	1,3	15,1	0,07	5,0	6,9	1,9	63,2	34,6	2,2
223	E-11-210	*I*	4	140	51	18	27	840	77	18	470	100	0,29	2,1	2,3	760	2,9	23	0,32	15,3	0,08	6,6	6,5	4,9	87,0	11,1	1,9
224	E-11-211	*I*	4	140	64	14	32	1100	120	26	390	49	0,41	2,7	3,6	710	3,6	42	0,47	15,4	0,08	5,4	5,9	4,9	62,9	32,1	5,0
225	E-11-212	*I*	5	130	46	12	20	340	72	11	420	57	0,28	2,4	1,4	760	2,2	21	0,23	15,4	0,07	5,2	6,7	4,9	78,0	19,1	2,9
226	E-11-213	*I*	4	200	61	20	28	2300	120	39	590	78	0,41	1,9	4,8	490	3,4	18	0,4	16,9	0,08	8,0	6,8	4,9	89,1	9,6	1,3

Примечание. Функциональные зоны: *I* – промышленная; *T* – транспортная; *Sm* и *Ss* – селитебные с многоэтажной и одноэтажной (юрточной) застройкой соответственно; *P* – пастбища; *B* – фоновая. Почвообразующие породы: 1 – четвертичных отложениях; 2 – раннемезозойских порфированых интрузивах; 3 – триасовой вулканической свите и суб-вулканических интрузивах; 4 – гранодиоритовой и гранитовой свитах пермского селенгинского комплекса; 5 – габбро и диоритовой свитах пермского селенгинского комплексов.

Приложение 3. Содержание ТММ и физико-химических свойств почвенных горизонтов в зоне влияния ДВМК

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
1	Z-13-01	A1	4	12	4	A	140	22	15	18	60	270	5,4	250	8,3	11	250	2,9	570	16	160	1,6	16	0,17	7	5,3	5,7
		B	12	33	4	A	150	25	15	19	42	170	5,1	290	2,1	0,28	3,3	1,4	870	5,7	31	0,36	17	0,27	7,2	3,4	5,6
2	Z-13-02	A1	2	10	4	ТЭ	170	44	17	26	42	120	5,5	340	2,2	0,23	2,2	0,93	900	12	23	0,41	14	0,41	7,5	4,4	5,3
		B	10	22	4	ТЭ	190	49	17	28	44	110	7,7	350	1,1	0,14	2	0,87	660	3	20	0,21	16	0,13	8,3	1,1	5,6
		C	25	30	4	ТЭ	200	53	17	29	48	100	7,7	350	1	0,15	2,2	1	580	3,2	21	0,25	16	0,10	8,3	0,7	5,8
3	Z-13-03	A1	1	14	4	ТЭ	190	48	20	27	61	120	5,8	320	2,2	0,27	2,1	1,1	620	5,8	29	0,43	15	0,21	8,3	4,7	5,5
		B	14	27	4	ТЭ	240	41	23	28	93	130	8,5	280	2	0,27	3,2	1,4	440	4,4	28	0,23	17	0,12	9,8	1,5	5,3
		C	30	335	4	ТЭ	290	34	26	29	130	130	7,8	240	1,6	0,2	2,2	1,2	360	19	27	0,16	17	0,14	12	0,4	5,4
4	Z-13-04	A1	4	8	4	A	190	89	22	35	80	94	6,6	320	1,6	0,21	2	1,1	520	3,6	19	0,27	15	0,20	8,1	5,6	5,3
		A1B	8	23	4	A	200	95	22	37	96	91	7,6	320	1,7	0,2	3	1,1	420	10	20	0,28	15	0,12	8,4	4,2	5,2
		B	23	43	4	A	200	99	21	38	93	85	8	360	1,2	0,14	2,1	1	420	3,5	20	0,27	17	0,11	8,3	1,7	5,8
		BC	43	60	4	A	260	100	30	45	180	99	8,8	480	1,2	0,16	2,5	1,2	380	5,7	15	0,16	19	0,15	10	0,7	5,5
5	Z-13-05	A1	5	7	4	ТЭ	130	68	15	30	32	89	4,2	230	6,4	0,25	3	1,2	790	10	29	0,7	12	0,36	5,7	11,3	4,8
		B	7	40	4	ТЭ	170	94	15	38	33	86	6	250	1,4	0,16	2,8	0,82	560	5,6	27	0,39	15	0,08	7,2	1,2	5,4
		BC	46	60	4	ТЭ	180	110	20	44	43	97	6,8	300	1,3	0,16	2,7	0,99	720	3,5	26	0,37	16	0,10	8,3	0,8	4,9
6	Z-13-06	A1	2	8	4	ТЭ	160	87	19	32	37	87	5,4	300	5,7	0,27	3,4	1,7	840	4,5	29	0,47	15	0,19	7,3	5,3	5,5
		B	8	30	4	ТЭ	190	120	21	44	52	110	8,5	290	1,2	0,16	2,6	1,3	700	13	27	0,4	17	0,10	9,1	1,1	5,4
		BC	30	80	4	ТЭ	190	110	25	48	53	93	9,4	310	1,8	0,16	2,5	1,4	590	9,3	26	0,39	17	0,12	8,9	0,5	5,4
7	Z-13-07	A1	1	17	4	ТЭ	160	70	18	30	42	100	6,4	390	11	0,33	2,5	2,8	860	12	38	1,2	17	0,23	7,4	4,3	5,1
		B	17	70	4	ТЭ	170	80	20	42	53	84	9,4	380	1,3	0,16	2,2	1,3	720	3,5	24	0,32	17	0,10	7,7	0,8	5,9
		BC	70	80	4	ТЭ	180	74	21	39	70	86	7	400	1,3	0,16	2,1	1,3	760	4,6	29	0,28	17	0,12	8,3	0,5	6,1
8	Z-13-08	#1	0	18	4	ТА	72	39	20	20	470	1700	41	160	65	32	8,7	190	340	780	3700	85	9,6	0,09	7,1	1,6	3,4
		#3	20	50	4	ТА	150	100	25	56	1000	700	9,9	330	13	9	3,1	6,2	730	30	160	5,7	16	0,12	7	1,1	4,2
		#4	50	80	4	ТА	130	84	32	79	170	1500	6,2	380	5,6	31	3,3	1,8	750	210	47	1,1	16	0,16	6,3	0,6	5,3

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг															Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
		#5	80	110	4	ТА	140	99	20	74	51	1300	8,6	350	2,2	47	2,8	1,5	730	42	57	1	16	0,23	7,1	0,8	5,6
		#6	110	140	4	ТА	140	99	20	74	51	1300	8,6	350	2,2	47	2,8	1,5	730	42	57	1	16	0,23	7,1	1,9	6,5
		#7	140	150	4	ТА	150	98	21	68	50	1200	8,3	360	1,9	23	2,5	4,2	750	14	56	0,99	16	0,20	6,9	1,5	6
9	Z-13-09	A1	2	24	4	ТЭ	140	94	17	38	49	130	7,4	300	22	0,52	2,9	2,8	690	26	72	2,6	15	0,13	6,9	3,9	5,3
		B	25	54	4	ТЭ	160	100	20	44	49	86	7,7	310	1,8	0,16	2,4	1,3	690	18	28	0,67	16	0,13	7,7	1,7	5,2
		BC	54	80	4	ТЭ	160	87	25	49	90	94	8,3	340	1,3	0,19	2,3	1,4	750	8,1	34	0,48	16	0,16	7,9	0,7	5,3
10	Z-13-13	A1Ca	2	35	1	ТА	130	100	15	52	49	130	5,8	360	7,6	0,51	3	3,7	710	22	51	1,3	14	0,10	6,2	6,0	6,8
		Bg	35	72	1	ТА	130	95	14	45	30	66	5,3	380	1,4	0,19	2,2	1,3	650	9,5	25	0,48	14	0,07	5,5	4,0	5,7
		BC	72	88	1	ТА	140	86	15	45	26	63	5,1	410	1	0,17	2,2	1,6	660	12	25	0,49	15	0,08	5,8	1,2	5,9
11	Z-13-16	A1	2	30	2	ТЭ	150	100	16	39	27	93	6,9	320	2,1	0,21	2,5	0,85	720	5,3	26	0,62	16	0,15	7,3	1,2	5,5
		(A1)	60	70	2	ТЭ	150	110	20	61	57	85	8,2	330	1,1	0,16	2,5	1	700	3,8	24	0,52	16	0,13	7,5	1,5	6,4
		(B)	70	130	2	ТЭ	160	110	20	60	34	91	9	360	1,3	0,25	2,3	1,1	700	4,8	24	0,47	16	0,14	7,5	0,5	5,9
12	Z-13-17	1	0	41	1	СА	37	7,1	0,7	4,4	60	87	6,8	78	620	1,6	13	23	430	430	390	73	12	0,07	2	0,2	5,1
		2	41	56	1	СА	32	7,2	0,6	1,2	32	420	7,3	73	260	5,6	20	22	480	580	1200	130	13	0,09	1,3	0,4	3,4
		3	56	75	1	СА	24	4	2,6	2,1	41	230	8,6	96	190	3	8,3	27	420	630	540	80	12	0,06	3,6	0,4	3,5
		4	75	82	1	СА	36	13	0,9	2	110	160	12	91	310	2,3	11	48	450	810	1100	76	12	0,08	2,9	0,1	3,3
		(A1)	82	87	1	СА	100	64	8,3	19	230	170	37	260	150	2,2	4,4	150	610	1600	1000	40	12	0,10	6,8	4,7	3
		(A1C)	87	101	1	СА	130	46	8,7	15	190	150	6,6	350	21	1,7	2,5	15	780	120	110	5,9	12	0,09	6,2	1,1	3,5
		(C)	101	120	1	СА	130	37	10	19	160	140	7,4	490	27	1,3	1,9	7,1	900	55	75	4,9	16	0,10	6,2	0,2	4
13	Z-13-18	A1	3	10	4	А	140	67	20	34	43	120	2,3	350	4,2	0,27	1,9	1,1	1100	8,4	24	1	13	0,35	6,3	8,0	5,6
		BC	10	50	4	А	250	130	34	58	110	79	4,1	530	1,1	0,14	1,1	0,66	570	2,1	9,5	0,13	17	0,12	9,7	0,2	5,6
14	Z-13-19	A1	2	8	4	ТА	120	65	15	31	24	80	1,8	350	4,5	0,18	2	0,83	870	7	25	0,67	12	0,29	5,6	8,3	5
		BC	8	78	4	ТЭ	140	74	17	35	34	61	5,3	390	1,1	0,11	1,8	0,66	680	2,4	18	0,28	15	0,09	6,5	0,6	5,5
15	Z-13-20	A1	1	10	4	ТА	100	70	15	36	28	59	2,7	340	1,5	0,15	1,9	0,78	670	3,6	21	0,57	13	0,09	5	2,4	5,1
		A1C	11	30	4	ТА	110	75	15	35	27	60	4,3	350	1,3	0,13	1,8	0,66	710	2,1	20	0,33	14	0,09	5,4	1,3	5,3

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
		(A1)	30	33	4	ТА	100	70	15	36	27	60	3,7	360	0,96	0,11	1,9	0,69	680	3,1	20	0,29	14	0,09	5,3	0,6	5,1
		(A1C)	33	52	4	ТА	100	69	13	39	24	49	3,1	400	1	0,15	2	0,68	660	1,7	17	0,23	14	0,09	4,9	0,2	5,2
		(A1)	51	58	4	ТА	110	71	11	39	41	61	3,3	370	0,89	0,12	1,6	0,61	610	3,8	17	0,22	13	0,07	5,1	0,5	5,2
		(A1C)	60	79	4	ТА	110	74	14	45	27	50	4,3	430	1,2	0,14	1,6	0,65	710	5	17	0,21	14	0,11	5,1	0,1	5,3
16	Z-13-21	A1g	1	9	1	ТА	86	88	13	54	18	50	3,4	330	1,5	0,12	1,4	0,76	580	9	18	0,33	12	0,08	4,4	2,0	6
		Bg	9	43	1	ТА	120	150	21	91	34	82	5,6	330	2	0,23	2	0,66	690	3,6	21	0,33	13	0,16	6,9	7,4	5,3
		C	43	60	1	ТА	70	75	9,8	41	7,9	34	1,3	330	0,88	0,07	1,1	0,34	550	1	11	0,12	11	0,08	3,4	0,6	5,5
17	Z-13-22	A1пах	0	30	1	ТА	110	71	13	48	57	110	4,3	310	32	0,62	2,6	2,7	580	53	82	7,1	12	0,12	5,2	7,8	6,3
		Bg	30	51	1	ТА	120	64	12	28	97	140	4	240	76	1,3	5,1	6,7	530	210	160	22	13	0,11	5,7	3,4	4,6
		BCg	51	110	1	ТА	120	65	17	35	33	120	5,2	390	4,3	0,91	1,9	1,8	690	58	23	1,5	14	0,11	6,3	7,7	5,1
18	Z-13-23	1	1	35	1	ТА	23	8,7	0,8	3	22	36	2,4	110	270	0,5	7,3	5,7	480	78	170	14	11	0,04	1,4	0,0	4,5
		2	35	48	1	ТА	76	26	4,3	5,5	26	63	4,7	110	370	0,79	7,2	13	460	350	230	31	11	0,07	4,6	0,7	3,3
		3	48	74	1	ТА	25	4	0,9	1,2	31	91	3,2	95	170	1,2	8	7,8	430	140	160	21	11	0,04	1,6	0,4	3,2
		4	74	88	1	ТА	22	4,8	0,5	1	32	200	2,9	93	190	2,2	8,4	11	370	220	190	28	12	0,06	1,3	0,3	3,1
		5	88	111	1	ТА	20	3,4	0,4	0,84	38	83	1,7	81	230	1,5	7	6,6	400	30	170	24	11	0,04	1,1	0,2	3
		6	111	137	1	ТА	25	6	0,4	0,83	16	33	2,6	100	180	0,42	6,2	9	490	56	150	10	12	0,04	1,2	0,0	3,2
19	Z-13-24	1	1	17	1	ТА	170	82	17	37	71	160	5,4	300	12	1,1	5,4	3,7	630	260	70	6,7	15	0,17	7,4	2,1	5,3
		(A1)	17	40	1	ТА	130	99	18	39	60	110	6	240	7,4	0,51	5,8	2,5	730	17	51	1,5	14	0,23	6,6	7,0	5,4
		(B)	40	80	1	ТА	140	110	23	47	30	76	7	220	1,7	0,16	3	0,83	710	9,3	28	0,82	15	0,14	7,5	1,1	5,4
20	Z-13-25	A1	0	20	1	ТА	130	99	17	47	36	83	7,9	320	9,8	0,2	2,4	0,66	750	2,6	27	0,46	15	0,10	6,9	6,6	4,8
		B	20	30	1	ТА	120	84	16	38	32	80	6,5	280	4,3	0,45	2,4	1,4	740	15	37	0,98	15	0,12	6,6	7,4	4,5
		BC	30	48	1	ТА	140	41	14	20	30	92	5,5	460	6	0,55	2,3	3	840	31	47	2,7	16	0,13	7,6	1,6	6
21	Z-13-26	1	0	22	1	СА	54	29	7,6	12	580	460	22	150	400	12	8,8	88	530	710	920	50	12	0,08	3,1	2,0	3,8
		2	22	54	1	СА	23	12	2,5	4,1	400	790	21	94	410	13	8,4	84	350	480	780	72	12	0,07	2	0,4	4
		3g	54	65	1	СА	35	39	2,8	6,3	610	600	50	110	530	35	13	280	410	1100	1600	62	13	0,11	1,8	0,9	4,5

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
		4	65	76	1	СА	21	12	1,6	2,2	350	420	30	100	520	8,1	9,3	150	400	470	600	33	11	0,06	1,9	0,4	3,9
22	Z-13-27	А1	2	5	1	СА	120	55	19	29	71	230	5,4	320	33	3,9	3,4	8	520	76	120	5,7	13	0,28	6,8	11,7	5,2
		А1Cg	5	18	1	СА	140	65	22	31	100	230	5,7	340	17	1,9	4	7,4	590	130	95	8	16	0,17	7,3	6,1	4,8
		С	18	40	1	СА	170	55	14	16	47	140	5,5	480	5,9	1,3	3,1	4,9	780	86	41	4	18	0,12	8,4	0,8	4,9
23	Z-13-28	А1	0	10	3	А	90	62	17	48	35	200	4,6	320	5,1	0,89	1,9	1,2	1100	7,6	90	0,69	11	0,87	6,2	11,9	5,8
		ВС	10	30	3	А	180	62	30	71	61	510	22	200	4,4	0,8	3,6	2,3	920	2,2	260	0,2	19	0,13	11	1,8	5,1
24	Z-13-29	А1	5	8,5	4	ТЭ	140	64	15	26	15	88	6,8	460	3,1	0,21	2,6	0,91	1100	5,9	34	0,33	17	0,35	7,2	7,2	5,1
		В	8,5	48	4	ТЭ	140	65	14	30	16	74	8,2	490	1,7	0,16	2,7	1,1	830	2,5	24	0,26	19	0,11	7,8	1,3	4,5
		ВС	48	64	4	ТЭ	140	20	13	13	20	80	5,8	780	1,8	0,14	2,3	0,76	1100	1,9	27	0,1	20	0,12	8,1	0,2	4,9
		С	64	108	4	ТЭ	180	16	18	16	24	100	7	930	1,8	0,16	2,2	0,54	1100	1,5	23	0,08	21	0,19	10	0,1	5,1
25	Z-13-30	АТ1	3	11	1	СА	39	19	7,9	23	5,9	24	64	650	2,2	0,14	0,76	0,52	310	3,4	7,2	0,22	2,9	0,06	15	25,0	7,1
		АТ2	11	52	1	СА	99	57	10	33	18	39	4,3	540	1,6	0,21	1,8	0,83	620	2,1	15	0,36	14	0,07	4,3	9,9	6,2
26	Z-13-31	А1	0	10	1	ТА	110	68	10	28	19	55	3,4	430	0,99	0,19	1,8	0,59	750	2,4	19	0,26	16	0,14	5,3	6,2	5,6
		В	10	21	1	ТА	120	71	9,7	25	12	55	3,4	440	0,75	0,13	2	0,72	740	4,2	19	0,31	16	0,11	5,3	1,1	5,3
		(А1)	21	33	1	ТА	130	76	10	31	18	57	5,4	360	0,72	0,15	2,1	0,56	650	1,8	17	0,25	15	0,09	6,5	4,4	5,5
		(В)	33	100	1	ТА	110	75	14	35	16	54	4,4	460	2,4	0,12	1,8	0,68	700	5,3	18	0,38	17	0,15	6,3	0,8	5,1
27	Z-13-32	А1	1	6	1	ТА	120	63	13	27	25	120	5	290	7,9	0,4	2,2	1,9	630	24	44	2	14	0,21	6,2	11,7	5,2
		В	6	39	1	ТА	150	86	16	34	37	110	7,7	310	1,9	0,22	2,7	1,4	600	15	27	1,6	18	0,12	8,3	1,3	4,8
		ВС	39	45	1	ТА	150	65	13	26	24	75	6,1	360	1,9	0,26	5,8	1,9	650	26	21	1,2	19	0,11	8,1	0,4	4,9
28	Z-13-33	хвосты	0	10	1	ТА	100	130	7,2	26	95	440	1,3	120	23	5,2	9,7	4,6	180	920	410	36	15	0,20	6	0,6	3,4
29	Z-13-34	А1С	0	14	3	А	130	25	16	13	67	120	3	170	10	0,52	1,6	2	390	53	47	2,9	13	0,68	8,3	11,9	5,3
30	Z-13-35	Ag	0	4	4	ТЭ	140	36	15	21	49	65	4,5	450	2	0,46	2	1,2	690	19	18	0,3	18	0,14	7	1,1	5,5
		В1	4	18	4	ТЭ	150	35	14	20	53	61	5,5	450	0,83	0,13	1,8	2	720	9,7	14	0,18	18	0,13	7,3	0,4	5,4
		В2	18	25	4	ТЭ	160	62	17	33	61	79	6,2	380	2,2	0,16	2,1	1,2	700	15	17	0,3	19	0,13	7,9	0,7	5,2

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
		С	25	30	4	ТЭ	160	69	16	32	38	78	6,2	340	1,3	0,15	2,3	1	700	4,9	19	0,3	18	0,17	8,4	1,7	5
		КС	30	50	4	ТЭ	160	78	16	38	53	76	5,6	350	1	0,17	2,1	0,93	630	2,3	17	0,26	17	0,13	8,2	0,7	5,1
		КС	70	80	4	ТЭ	170	60	16	30	56	78	6,8	420	0,84	0,19	2,1	1,1	690	2,6	17	0,22	17	0,14	8,6	0,5	5,3
		КС	115	130	4	ТЭ	200	53	16	27	54	75	6,3	410	3	0,16	2,1	1,1	620	4,1	15	0,2	18	0,15	9,4	0,8	5,2
31	Z-13-36	А1	0	14,5	4	А	150	70	16	30	38	75	6,9	330	1,3	0,16	2,2	0,72	720	2,8	18	0,26	18	0,13	7,7	11,9	5,6
		А1В	14,5	46	4	А	150	75	15	37	35	76	9,3	360	1,1	0,12	1,8	0,67	650	2,1	16	0,21	18	0,12	8,3	0,3	5,5
		В	46	52	4	А	150	42	15	30	64	60	17	290	1,4	0,12	1,7	0,89	490	2,7	12	0,1	18	0,10	7,4	0,6	5,8
		ВСа	52	110	4	А	160	27	16	17	70	59	24	310	1,5	0,13	2,1	1,1	470	3,9	11	0,05	20	0,10	7,1	0,5	6,1

Примечание. Почвообразующие породы (П/п): 1 – четвертичных отложениях;: 2 – среднепермской-нижнетриасовой чернояровской свите; 3 – кембрийской комплексе (джидинская и хохюртовская свиты); 4 – палеозойский джидинской комплекс (первая фаза). Элементарные ландшафты: А – автономный; ТЭ – трансэлювиальный; ТА – трансаккумулятивный; СА – супераквальный.

Приложение 4. Содержание ТММ и физико-химических свойств почвенных горизонтов в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт»

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
1	Е-12-01	А1С	0	12,5	5	А	210	38	17	24	57	99	6,9	670	2,5	0,2	3,4	0,68	550	0,77	14	0,1	18	0,11	8,2	6,8	5,8
2	Е-12-02	АДСа	0	8	5	ТЭ	160	50	20	44	50	93	7	730	0,83	0,17	2,3	0,67	560	0,47	11	0,09	16	0,08	6,6	5,8	7,4
		А1Са	8	23	5	ТЭ	160	74	22	60	54	95	8,2	690	0,57	0,14	1,6	0,46	490	0,41	10	0,08	14	0,08	6,1	2,6	7,4
		ВСа	23	50	5	ТЭ	250	200	36	120	74	130	5,1	900	0,39	0,16	1,7	0,4	670	0,36	14	0,07	18	0,13	9,1	0,5	7,4
		ВССа	50	86	5	ТЭ	280	210	39	120	76	120	6,5	940	0,23	0,16	1,8	0,35	620	0,32	19	0,09	19	0,14	10	0,3	7,5
		ССа	86	100	5	ТЭ	310	78	32	54	70	120	5,3	830	1,4	0,17	3	0,35	380	0,68	12	0,06	16	0,16	12	0,3	7,5
3	Е-12-03	А1	0	25	5	ТЭ	140	56	15	34	32	74	9	350	1,2	0,22	3	0,64	560	1	15	0,19	16	0,08	6,1	3,8	6,7
		А1В	25	33	5	ТЭ	180	74	18	49	43	100	12	390	1,2	0,22	3,2	0,88	580	1,5	18	0,24	18	0,10	7,1	1,8	7,4
		ВСа	33	82	5	ТЭ	140	52	15	39	31	76	9,6	540	0,9	0,2	2,8	0,68	550	1	14	0,15	16	0,08	5,4	0,3	7,8
		ССа	82	115	5	ТЭ	210	37	18	27	37	130	12	330	3,3	0,26	4,8	0,93	420	1,5	22	0,1	19	0,11	10	0,3	7,4
4	Е-12-04	А1	0	24	5	ТА	180	66	16	36	44	85	9,6	410	2,6	0,2	2,9	1,7	670	2,2	18	0,19	20	0,12	6,9	2,3	7,0
		А1В	24	35	5	ТА	190	61	20	45	64	83	11	420	0,75	0,19	3	1,2	570	1,2	18	0,13	18	0,11	7,4	1,5	7,3
		ВСа	35	105	5	ТА	190	58	21	45	70	91	12	560	0,81	0,18	3,2	1,3	620	0,91	18	0,1	19	0,10	7,5	0,3	7,4
5	Е-12-05	А1	0	21	1	ТА	160	63	17	37	35	88	11	340	1,7	0,21	2,9	0,93	590	1,6	21	0,26	18	0,12	6,9	3,8	6,7
		А1ССа	21	83	1	ТА	150	66	17	43	40	93	12	490	1,4	0,24	3	0,91	590	19	0,91	0,03	17	0,10	6,2	1,7	7,7
		ССа	83	93	1	ТА	270	72	19	36	35	100	13	540	2,2	0,21	3	0,84	600	1,3	21	0,3	17	0,13	10	1,2	6,8
6	Е-12-06	А1 нам	0	57	4	ТА	190	46	15	23	40	83	8,6	440	1,4	0,21	3,4	0,96	580	1,2	15	0,11	17	0,10	7,1	3,5	6,3
		(А1)	57	80	4	ТА	180	47	18	31	50	91	10	450	1,3	0,27	3,6	1	570	1,1	18	0,14	18	0,11	7,7	1,8	7,3
7	Е-12-07	А1	0	22,5	2	А	200	53	16	29	42	79	10	410	1,2	0,18	3	0,75	530	1,2	16	0,17	17	0,11	7,5	3,4	7,5
		ВСа	22,5	55	2	А	170	51	22	42	52	79	11	580	0,8	0,17	2,2	0,58	640	0,62	12	0,08	15	0,08	6,5	1,2	7,4
		ССа	55	85	2	А	200	55	25	43	66	91	15	480	0,94	0,17	2,1	0,69	210	1,3	8,4	0,05	16	0,10	7,3	0,5	7,4
8	Е-12-08	А1	0	10	2	ТЭ	190	59	17	32	72	91	11	500	2,1	0,19	3	0,83	600	1,2	17	0,17	18	0,10	7,6	4,3	6,9
		А1С	10	23,5	2	ТЭ	200	72	17	34	41	81	10	480	1,2	0,18	3	0,8	600	1,3	16	0,17	17	0,11	7,7	2,9	7,1

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
		CCa	23,5	55	2	ТЭ	150	44	18	37	46	83	11	630	0,86	0,17	2,6	0,81	520	1,3	14	0,14	15	0,08	5,9	1,4	7,4
9	Е-12-09	A1Ca	0	60	2	ТЭ	170	63	17	37	42	85	9,9	370	1,6	0,22	3,2	0,8	590	1,3	18	0,24	17	0,11	6,9	3,6	7,0
		BCa	60	139	2	ТЭ	180	53	18	39	46	84	11	670	1,2	0,19	2,9	1,1	510	1,2	16	0,21	16	0,10	6,6	0,5	8,2
		CCa	139	160	2	ТЭ	190	56	21	38	66	91	10	590	1,1	0,21	3,1	1	540	1,4	17	0,2	17	0,13	7,6	1,1	7,5
10	Е-12-10	A1	0	22,5	4	ТЭ	150	66	15	35	65	73	21	290	11	0,18	3,3	2	600	2,5	24	0,46	17	0,10	6,4	5,0	7,0
		BCa	22,5	37	4	ТЭ	140	65	16	45	55	73	18	330	10	0,18	2,8	1,8	570	2,1	20	0,35	16	0,09	6,2	2,1	7,3
		BCCa	37	50	4	ТЭ	120	52	15	39	80	72	25	390	13	0,2	2,8	2,3	560	2,3	21	0,39	15	0,07	5,2	1,7	7,4
		CCa	50	70	4	ТЭ	120	48	12	32	140	63	52	320	39	0,2	3,5	6,5	650	4,5	35	0,85	17	0,06	5,3	1,6	7,7
11	Е-12-11	A1	0	25	4	ТЭ	140	59	15	31	640	89	23	300	20	0,21	2,8	2	600	2,3	24	0,36	16	0,10	6,8	3,6	7,2
		BCa	25	50	4	ТЭ	150	65	15	44	75	70	15	400	5,6	0,17	2,8	1,2	640	2,8	20	0,29	18	0,09	6,3	1,7	7,3
		BCCa	50	63	4	ТЭ	110	47	14	36	61	68	13	480	6,5	0,22	2,8	1,2	510	1,5	16	0,24	13	0,07	4,7	1,1	7,5
		CCa	63	71	4	ТЭ	110	36	11	25	81	60	22	430	24	0,22	3,1	2,4	690	4,1	28	0,65	17	0,06	4,3	0,7	7,6
12	Е-12-12	A1	0	20	1	ТА	120	44	12	25	480	86	35	320	41	0,29	2,8	4	690	2,9	29	0,51	16	0,08	5,9	4,6	7,4
		C	20	36	1	ТА	130	46	12	23	680	90	47	310	55	0,33	3	5	690	3,5	35	0,63	17	0,07	7	2,3	7,1
		(A1)	36	51	1	ТА	120	50	11	25	540	93	35	310	42	0,29	3,1	3,8	680	3,4	31	0,53	17	0,07	6,2	4,2	7,0
13	Е-12-13	A1	0	16	1	ТА	130	39	11	19	47	83	8	390	4,1	0,23	2,7	0,77	540	1,1	14	0,21	16	0,10	5,7	5,7	7,3
		A1C	16	26	1	ТА	170	41	11	21	35	75	7,6	420	5,6	0,19	2,7	0,69	550	1,1	12	0,18	16	0,10	7,5	2,0	7,2
		C1	26	43	1	ТА	160	42	12	26	37	78	7,8	410	2,5	0,21	2,7	0,72	510	1,5	13	0,2	16	0,11	6,8	1,9	6,8
		C2	43	48,5	1	ТА	130	32	11	18	29	65	7,2	390	2,1	0,17	2,4	0,7	540	1,3	12	0,17	16	0,10	5,6	0,7	7,2
		C3	48,5	60	1	Та	140	34	12	21	35	75	7,8	390	2,6	0,19	2,6	0,71	550	0,99	12	0,18	17	0,11	6,2	1,1	7,3
		C4(Ca)	60	83	1	ТА	130	45	15	29	39	84	8,6	350	2,6	0,25	2,7	0,77	560	1,3	16	0,23	17	0,14	6	2,8	7,4
		C5Ca	83	115	1	ТА	120	46	15	34	58	89	10	480	4,9	0,28	2,8	0,8	460	1,4	15	0,23	15	0,11	5,7	4,9	7,6
14	Е-12-14	A1C	0	15	2	А	170	24	4,7	17	100	39	11	180	7,2	0,18	2,7	0,87	220	2,8	13	0,35	8,3	0,03	4,2	7,9	5,3
15	Е-12-15	A1Ca	0	12,5	2	ТЭ	190	55	13	30	29	63	9,5	280	1,8	0,19	2,6	0,7	440	1,4	14	0,23	14	0,08	6,1	3,5	7,2
		BCa	12,5	100	2	ТЭ	130	40	17	33	34	65	8,9	690	1,3	0,17	2,3	0,63	450	1,2	11	0,17	13	0,06	5	1,0	7,8

№	Точка	Индекс горизонта	Верхняя граница	Нижняя граница	П/п	Элементарный ландшафт	Содержание ТММ в почвенных горизонтах, мг/кг																Физико-химические свойства почвенных горизонтов				
							V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Гумус	pH
16	Е-12-16	А1С	0	11,7	5	А	208	33	15	27	59	95	7,1	635	2,3	0,19	3,3	0,66	530	0,78	12	0,16	17	0,09	6,3	6,6	5,6
17	Е-11-01	Ад	0	12	1	ТА	130	53	16	28	29	77	8,6	350	1,6	0,25	2,2	0,7	660	1,5	19	0,24	15	0,10	4,9	5,3	7,0
		А1	12	23	1	ТА	150	55	16	32	25	71	10	540	1,1	0,19	2,8	1	840	1,7	19	0,34	15	0,10	5,5	3,8	7,6
		А1В	23	37,5	1	ТА	160	61	16	38	25	76	10	530	0,95	0,18	2,8	0,98	830	2	17	0,27	15	0,09	5,6	3,9	8,8
		D	37,5	88	1	ТА	130	48	16	33	26	76	13	800	0,86	0,15	1,6	1	640	0,89	15	0,14	13	0,06	4,4	5,1	9,5
18	Е-11-124	А1	0	15	4	А	190	84	20	46	41	100	5,8	580	2,5	0,21	2,8	1,3	710	1,1	17	0,23	16,2	0,11	6,22	1,9	7,1
		А1В	15	38	4	А	230	88	29	70	23	99	3	930	0,85	0,13	1,8	0,2	580	1,3	11	0,06	17	0,11	7,9	2,2	7,2
		Bm	38	60	4	А	220	77	25	57	31	87	5,5	830	0,78	0,13	2,2	0,36	650	1,5	16	0,15	18	0,10	7,5	1,8	7,1

Примечание. Почвообразующие породы (П/п): 1 – четвертичных отложениях; 2 – раннемезозойских порфированых интрузивах; 3 – триасовой вулканической свите и суб-вулканических интрузивах; 4 – гранодиоритовой и гранитовой свитах пермского селенгинского комплекса; 5 – габбро и диоритовой свитах пермского селенгинского комплексов. Элементарные ландшафты: А – автономный; ТЭ – трансэлювиальный; ТА – трансаккумулятивный; СА – супераквальный.

Приложение 5. Содержание ТММ в ассимилирующих и многолетних органах древесных растений в зоне влияния ДВМК

№	Точка	Функциональная зона	Зольность, %	Содержание ТММ в органах древесных растений (мг/кг)																
				V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
Хвоя лиственницы сибирской (Lárix sibírica Ledeb.)																				
1	З-1301	*B*	3,3	< 0,05	< 0,08	870	48	0,074	0,22	3,6	13	< 0,08	39	0,093	0,022	0,03	0,01	90	0,2	0,16	0,011
2	З-1302	*R*	3,4	0,45	0,26	810	150	0,19	0,65	4,1	12	< 0,08	48	0,062	0,039	0,05	0,02	73	1	0,89	0,026
3	З-1303	*S*	2,9	0,44	< 0,08	280	150	0,16	0,44	3,3	9,6	< 0,08	59	0,085	0,02	0,03	0,02	38	1,3	0,76	0,033
4	З-1304	*B*	3,2	0,095	< 0,08	380	66	0,13	0,37	3,3	12	< 0,08	73	0,056	0,023	0,03	0,01	66	0,53	0,31	0,015
5	З-1305	*R*	2,8	0,098	< 0,08	520	52	0,11	0,77	2,8	10	< 0,08	28	0,12	0,056	0,03	0,01	92	1,7	0,42	0,019
6	З-1314	*R*	2,7	0,097	< 0,08	160	89	0,075	0,63	3,1	9,4	< 0,08	34	0,064	0,0095	0,10	0,01	58	0,88	0,55	0,021
7	З-1318	*R*	2,9	< 0,05	0,3	840	47	0,13	0,4	2,9	9,4	< 0,08	39	0,034	0,024	0,03	0,01	81	1,2	0,31	0,013
8	З-1324	*I*	4,3	1,3	6,6	220	620	1,4	2,9	6,1	18	0,12	68	0,72	0,043	0,15	0,09	41	21	3,4	0,150
9	З-1325	*S*	2,6	0,23	< 0,08	8,7	84	0,043	0,52	3,3	13	< 0,08	32	1,4	0,046	0,04	0,03	24	0,71	0,66	0,025
10	З-1327	*S*	3,4	0,38	< 0,08	160	120	0,22	1	4,5	22	< 0,08	110	0,21	0,13	0,05	0,03	63	2,6	1,2	0,052
11	З-1328	*B*	3,2	0,084	< 0,08	560	55	0,074	0,54	2,9	9,4	< 0,08	42	0,052	0,0051	0,02	0,00	43	0,37	0,22	0,009
12	З-1332	*S*	3,9	0,51	0,31	150	160	0,18	2,3	4,3	15	< 0,08	88	0,12	0,014	0,03	0,02	61	1,7	0,83	0,040
13	З-1334	*R*	3,9	0,38	0,25	690	140	0,12	0,36	4	14	< 0,08	110	0,14	0,034	0,05	0,03	49	4	3,7	0,200
14	Z-13-02	*S*	4,1	2,3	0,98	55	580	0,29	1,1	6	21	0,11	78	0,74	0,15	0,11	0,11	24	32	6,9	0,350
15	Z-13-09	*S*	5,5	0,31	< 0,08	130	130	0,064	0,67	2,4	9,7	< 0,08	51	0,46	0,012	0,03	0,01	31	0,63	0,43	0,014
16	Z-13-10	*I*	3,9	0,51	0,31	250	170	0,18	1,3	4,8	21	< 0,08	160	0,41	0,14	0,05	0,03	34	4,2	1,5	0,072
17	Z-13-11	*S*	5,5	0,66	0,57	630	260	0,12	0,55	5,1	14	< 0,08	47	0,29	0,051	0,05	0,10	51	6	9,1	0,710
18	Z-13-12	*S*	4,3	0,84	0,34	200	290	0,2	1,3	5,3	22	< 0,08	150	0,22	0,097	0,05	0,03	83	2,4	1,6	0,058
19	Z-13-14	*S*	3,9	3,2	1,4	140	830	0,45	2	7,7	26	0,13	95	0,5	0,096	0,11	0,14	63	8	5,2	0,230
20	Z-13-15	*S*	4,7	1,2	49	58	450	0,51	24	6	17	< 0,08	79	1,3	0,063	0,13	0,09	27	6	3,4	0,160
21	Z-13-19	*S*	3,2	2,8	1,3	59	730	0,35	1,4	6,6	21	0,17	44	1,2	0,099	0,15	0,24	41	10	7,2	0,330
Кора лиственницы сибирской (Lárix sibírica Ledeb.)																				
1	З-1301	*B*	1,3	0,19	< 0,08	210	52	0,053	0,29	3,2	7,2	< 0,08	18	0,081	0,058	0,04	0,02	75	0,18	0,38	0,015
2	З-1302	*R*	1,3	0,15	< 0,08	150	37	0,071	0,25	3,4	8,4	< 0,08	30	0,03	0,1	0,03	0,01	57	0,12	0,29	0,008
3	З-1303	*S*	2,6	2,2	0,67	50	540	0,32	1,3	4	8,5	< 0,08	55	0,23	0,036	0,06	0,07	54	1,4	2,1	0,090
4	З-1304	*B*	1,8	1,6	0,54	150	350	0,25	1,1	3,9	13	< 0,08	39	0,39	0,064	0,08	0,07	89	2,7	4,7	0,220

№	Точка	Функциональная зона	Зольность, %	Содержание ТММ в органах древесных растений (мг/кг)																	
				V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
5	З-1305	*R*	2,0	1,4	0,53	180	300	0,19	0,83	4,7	18	< 0,08	27	0,65	0,15	0,09	0,30	120	11	8,9	0,480
6	З-1314	*R*	1,6	0,44	< 0,08	160	78	0,059	0,34	2,7	8,6	< 0,08	46	0,082	0,045	0,03	0,02	33	0,43	1,1	0,029
7	З-1318	*R*	1,3	1,1	0,49	240	250	0,17	0,76	3	10	< 0,08	27	0,15	0,1	0,06	0,04	100	2,5	1,8	0,080
8	З-1324	*I*	4,6	5,4	12	170	1800	3,5	7,2	15	26	0,45	42	1,6	0,2	0,70	0,43	50	38	19	0,630
9	З-1325	*S*	2,4	3	1,3	75	670	0,39	1,7	6	15	0,18	41	1,2	0,14	0,11	0,18	27	7,1	4,4	0,260
10	З-1327	*S*	3,4	2,3	0,7	190	430	0,43	1,3	6	28	0,17	56	1,1	0,4	0,11	0,19	86	7,3	8,2	0,390
11	З-1328	*B*	1,8	2,7	1,1	180	610	0,29	1,6	4,1	11	0,16	49	0,99	0,12	0,09	0,12	70	6	4,7	0,340
12	З-1332	*S*	4,8	3,2	1,3	260	760	0,61	1,9	5,2	21	0,16	190	0,65	0,097	0,12	0,12	130	6,4	5,4	0,300
13	З-1334	*R*	4,1	2,1	1	350	490	0,22	0,85	8,9	16	< 0,08	97	1	0,22	0,16	0,27	32	26	17	1,400
14	Z-13-02	*S*	3,4	1,4	0,71	180	350	0,26	0,91	6,2	19	0,12	38	0,71	0,19	0,10	0,33	40	7,2	13	0,480
15	Z-13-09	*S*	2,4	0,91	0,37	130	220	0,18	0,75	8,9	9	< 0,08	37	0,64	0,024	0,04	0,05	34	0,86	1,1	0,024
16	Z-13-10	*I*	1,3	0,35	0,18	99	77	0,075	0,29	3,8	5,7	< 0,08	47	0,33	0,11	0,03	0,04	25	0,8	0,79	0,037
17	Z-13-11	*S*	1,8	3,6	2,3	210	760	0,31	1,6	7,9	15	0,11	16	0,77	0,18	0,23	0,19	44	26	25	1,500
18	Z-13-12	*S*	2,8	1,8	0,6	64	350	0,4	1,4	5,5	17	< 0,08	76	0,55	0,099	0,07	0,08	45	2,8	5,8	0,120
19	Z-13-14	*S*	3,1	1,6	0,58	58	380	0,29	1	5	13	< 0,08	66	0,56	0,14	0,07	0,12	58	5,6	4,6	0,140
20	Z-13-15	*S*	2,3	1,9	0,57	230	350	0,32	1,6	5,7	19	< 0,08	67	0,6	0,14	0,08	0,18	28	5,4	4,8	0,210
21	Z-13-19	*S*	2,6	1,3	0,69	82	300	0,21	0,66	4	9,3	< 0,08	27	1,1	0,071	0,09	0,18	35	4,3	3,1	0,150
Листья березы плосколистной (Bétula platyphýlla Sukaczev)																					
1	Z-13-01	*B*	5,85	< 0,08	0,26	410	45	0,18	0,98	5,7	120	< 0,03	71	0,18	0,14	0,04	0,01	140	0,15	0,16	0,006
2	Z-13-02	*R*	5,85	0,15	0,46	940	94	0,34	2,7	5,3	78	< 0,03	100	0,098	0,14	0,04	0,01	220	0,53	0,3	0,010
3	Z-13-03	*R*	5,85	0,21	0,32	220	88	0,25	1,3	4,6	47	< 0,03	52	0,1	0,11	0,08	0,01	52	0,68	0,44	0,018
4	Z-13-04	*B*	5,85	< 0,08	0,31	470	39	0,16	0,95	4,3	80	< 0,03	96	0,15	0,1	0,03	0,00	240	0,2	0,17	0,005
5	Z-13-05	*R*	5,85	0,13	0,5	1200	82	0,29	2,9	4,7	97	< 0,03	58	0,48	0,16	0,04	0,01	260	1,5	0,68	0,017
6	Z-13-06	*R*	5,85	< 0,08	0,22	450	53	0,54	2,1	4,5	47	< 0,03	49	0,22	0,15	0,03	0,01	160	0,54	0,63	0,017
7	Z-13-07	*I*	5,85	0,16	0,38	630	71	0,23	2	4,9	170	< 0,03	73	1,6	0,25	0,04	0,03	150	1,2	1,5	0,032
8	Z-13-14	*R*	5,85	< 0,08	0,27	560	51	0,55	2,5	3,5	53	< 0,03	39	0,12	0,061	0,04	0,01	120	0,46	0,37	0,011
9	Z-13-16	*R*	5,85	0,12	9,2	410	89	0,3	7,4	5,3	95	< 0,03	92	0,28	0,11	0,04	0,01	85	0,51	0,44	0,016
10	Z-13-18	*R*	5,85	< 0,08	14	840	94	0,33	9,2	3,1	27	< 0,03	62	0,23	0,097	0,04	0,01	160	0,2	0,2	0,007

№	Точка	Функциональная зона	Зольность, %	Содержание ТММ в органах древесных растений (мг/кг)																	
				V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
11	Z-13-21	*S*	5,85	< 0,08	19	240	120	0,31	13	4,6	45	< 0,03	53	0,61	0,065	0,06	0,01	19	0,067	0,14	0,004
12	Z-13-25	*S*	5,85	0,46	62	330	310	0,67	35	6,5	190	0,047	38	2,5	0,18	0,10	0,03	40	0,68	0,7	0,024
13	Z-13-27	*R*	5,85	0,26	0,84	900	110	1,4	2,4	8,5	320	< 0,03	74	0,54	0,5	0,04	0,03	61	2	1,3	0,044
14	Z-13-28	*B*	5,85	< 0,08	0,34	630	52	0,22	2	5	65	< 0,03	76	0,12	0,076	0,04	0,01	80	0,13	0,27	0,009
15	Z-13-31	*B*	5,85	< 0,08	2,7	340	54	0,37	5,5	5,1	49	< 0,03	38	0,051	0,067	0,03	0,00	75	0,12	0,12	0,003
16	Z-13-32	*S*	5,85	0,6	0,62	1300	200	0,9	4,2	7,1	190	< 0,03	89	0,34	0,32	0,04	0,03	99	1,5	0,84	0,030
17	Z-13-34	*R*	5,85	< 0,08	0,52	1100	78	0,14	0,93	4,9	65	< 0,03	89	0,14	0,14	0,03	0,02	73	1,1	1,5	0,069
18	ZR-002	*S*	5,85	0,51	0,68	340	160	0,25	3,1	6,3	190	0,043	45	1,6	0,15	0,04	0,05	56	11	3,2	0,087
19	ZR-004	*I*	5,85	3,1	160	460	1100	2	79	10	190	0,2	58	3,7	0,24	0,31	0,05	64	1,5	1,3	0,041
20	ZR-005	*I*	5,85	0,55	43	1100	310	0,64	16	4,9	160	0,044	50	0,99	0,25	0,14	0,02	42	0,36	0,41	0,013
21	ZR-006	*S*	5,85	0,19	0,28	360	68	0,12	0,74	8,9	98	< 0,03	38	0,51	0,1	0,04	0,01	51	0,49	0,34	0,010
22	ZR-007	*S*	5,85	< 0,08	4,1	560	81	0,47	4	4,8	56	< 0,03	42	0,14	0,12	0,04	0,01	120	0,33	0,36	0,009
23	ZR-008	*S*	5,85	0,27	0,42	160	110	0,17	2,6	4,5	65	< 0,03	66	0,36	0,061	0,04	0,02	42	0,57	0,4	0,012
24	ZR-009	*S*	5,85	0,21	0,47	720	90	0,56	2,6	6,3	220	< 0,03	63	0,25	0,12	0,04	0,01	64	0,47	0,44	0,009
25	ZR-010	*I*	5,85	0,11	0,29	800	61	0,35	1,9	5,5	190	< 0,03	86	2,9	0,32	0,05	0,01	68	0,43	0,57	0,018
26	ZR-011	*S*	5,85	0,17	0,55	1100	98	0,36	1,7	5	83	< 0,03	53	0,11	0,14	0,04	0,02	100	1,3	3,8	0,190
27	ZR-013	*S*	5,85	0,63	0,5	640	170	0,41	2	6,2	210	< 0,03	78	1,2	0,35	0,05	0,07	65	2	1,5	0,053
28	ZR-016	*S*	5,85	0,52	0,39	240	150	0,25	2,3	6,2	150	< 0,03	61	1,3	0,27	0,05	0,10	88	2,4	1,5	0,052
29	ZR-017	*S*	5,85	0,79	0,53	130	210	0,25	1,6	6,1	170	< 0,03	35	1,3	0,36	0,06	0,23	30	5,5	4,2	0,130
30	ZR-018	*I*	5,85	0,34	0,36	380	100	0,23	1,6	5,2	200	< 0,03	62	0,68	0,14	0,04	0,02	66	0,82	0,77	0,024
31	ZR-019	*S*	5,85	0,54	0,96	230	150	0,28	1,7	6,1	180	< 0,03	74	1,3	0,2	0,05	0,06	72	2,9	1,7	0,047
32	ZR-020	*S*	5,85	0,65	0,41	120	160	0,2	1,8	6	140	< 0,03	73	1,1	0,15	0,05	0,04	31	2,8	1,2	0,045
Кора березы плосколистной (Bétula platyphýlla Sukaczev)																					
1	Z-13-01	*B*	0,6	< 0,06	0,19	280	7,2	0,012	0,14	4,9	77	0,0083	3,7	0,013	0,063	0,05	0,01	10	0,018	0,079	0,003
2	Z-13-02	*R*	0,6	< 0,06	0,28	130	8	0,048	0,16	4,5	44	0,013	5,3	0,021	0,025	0,05	0,01	22	0,033	0,11	0,003
3	Z-13-03	*R*	0,6	< 0,06	0,3	270	8,7	0,047	0,12	6,1	86	0,0093	4,8	0,014	0,07	0,04	0,01	4,6	0,045	0,094	0,003
4	Z-13-04	*B*	0,6	0,22	0,18	550	22	0,052	0,17	4,9	80	< 0,005	4,6	0,011	0,072	0,03	0,00	16	0,2	0,21	0,006
5	Z-13-05	*R*	0,6	0,33	0,24	1100	5,5	0,1	0,25	4,7	91	< 0,005	12	0,011	0,15	0,04	0,00	74	0,011	0,041	< 0,001

№	Точка	Функциональная зона	Зольность, %	Содержание ТММ в органах древесных растений (мг/кг)																	
				V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
6	Z-13-06	*R*	0,6	< 0,06	0,2	730	8,4	0,08	0,39	7,6	170	< 0,005	9,1	0,021	0,32	0,03	0,00	30	0,046	0,31	0,007
7	Z-13-07	*I*	0,6	< 0,06	0,4	620	8,3	0,031	0,17	5,1	110	0,01	5,8	0,016	0,24	0,04	0,00	16	0,022	0,18	0,005
8	Z-13-14	*R*	0,6	< 0,06	0,22	220	3,9	0,05	0,14	5,2	62	< 0,005	4	0,0078	0,05	0,04	0,00	19	0,069	0,081	0,002
9	Z-13-16	*R*	0,6	< 0,06	0,26	310	5,9	0,039	0,23	5,1	84	< 0,005	3	0,014	0,058	0,04	0,00	4	0,031	0,11	0,004
10	Z-13-18	*R*	0,6	< 0,06	0,17	350	5,1	0,043	0,17	5,4	61	< 0,005	5,8	0,0091	0,075	0,03	0,00	19	0,084	0,085	0,005
11	Z-13-21	*S*	0,6	< 0,06	0,14	330	20	0,039	0,27	6,3	66	0,014	4,3	0,013	0,12	0,03	0,00	5,1	0,046	0,11	0,004
12	Z-13-25	*S*	0,6	< 0,06	0,12	310	13	0,029	0,25	5,6	110	< 0,005	2,4	0,049	0,13	0,04	0,01	2,4	0,1	0,18	0,009
13	Z-13-27	*R*	0,6	0,24	0,08	900	8,8	0,12	0,25	6,2	160	< 0,005	7,6	0,028	0,43	0,03	0,01	12	0,04	0,29	0,009
14	Z-13-28	*B*	0,6	< 0,06	0,13	310	6,8	0,03	0,22	6,2	89	0,01	5,7	0,022	0,12	0,03	0,00	4,9	0,029	0,12	0,004
15	Z-13-31	*B*	0,6	0,26	0,11	530	31	0,047	0,35	5,3	150	0,02	3	0,012	0,054	0,03	0,00	7,2	0,051	0,19	0,004
16	Z-13-32	*S*	0,6	0,26	0,18	510	34	0,048	0,38	5,4	130	0,016	3,2	0,0082	0,055	0,03	0,00	7	0,11	0,15	0,003
17	Z-13-34	*R*	0,6	0,32	0,079	1100	6	0,024	0,11	6,1	100	< 0,005	11	0,012	0,13	0,03	0,00	15	0,028	0,58	0,007
18	ZR-002	*S*	0,6	< 0,06	0,17	510	13	0,027	0,23	5,6	200	< 0,005	4,3	0,034	0,12	0,03	0,01	7,2	0,46	0,24	0,009
19	ZR-004	*I*	0,6	1,3	0,48	510	270	0,22	0,93	6,8	130	0,059	7,5	0,068	0,27	0,08	0,04	8,3	2,5	2,1	0,064
20	ZR-005	*I*	0,6	0,35	0,15	880	36	0,1	0,36	5,1	88	< 0,005	8,3	0,023	0,38	0,04	0,02	16	0,39	0,39	0,013
21	ZR-006	*S*	0,6	< 0,06	0,2	120	13	0,022	0,11	4,5	100	< 0,005	2,2	0,029	0,024	0,03	0,00	4,5	0,058	0,13	0,006
22	ZR-007	*S*	0,6	< 0,06	0,074	310	20	0,037	0,34	4,9	95	0,013	3,8	0,013	0,076	0,03	0,01	7	0,31	0,39	0,007
23	ZR-008	*S*	0,6	0,36	0,24	62	100	0,08	0,5	4,2	73	0,026	4,5	0,021	0,021	0,05	0,01	3,9	0,096	0,29	0,008
24	ZR-009	*S*	0,6	0,33	0,13	840	15	0,064	0,23	5,5	160	< 0,005	3,4	0,016	0,065	0,03	0,00	4,4	0,036	0,092	< 0,001
25	ZR-010	*I*	0,6	< 0,06	0,036	310	9	0,043	0,21	6,4	150	< 0,005	6,9	0,016	0,22	0,03	0,00	11	0,076	0,13	0,004
26	ZR-011	*S*	0,6	0,5	0,14	1400	10	0,027	0,14	5,1	64	< 0,005	5,1	0,011	0,094	0,03	0,00	17	0,24	0,68	0,021
27	ZR-013	*S*	0,6	0,43	0,33	820	47	0,064	0,27	7,5	190	0,013	7,6	0,036	0,24	0,03	0,02	14	0,61	0,56	0,016
28	ZR-016	*S*	0,6	0,87	0,32	540	140	0,13	0,82	8,2	140	0,041	7,7	0,14	1,9	0,05	0,09	9,1	2,2	2,4	0,077
29	ZR-017	*S*	0,6	< 0,06	< 0,05	170	23	0,051	0,19	5,3	150	0,019	8,9	0,058	0,41	0,03	0,03	20	1,8	0,86	0,021
30	ZR-018	*I*	0,6	< 0,06	0,21	410	16	0,038	0,21	5	130	< 0,005	7,1	0,015	0,15	0,03	0,00	6,8	0,26	0,2	0,007
31	ZR-019	*S*	0,6	< 0,06	0,2	140	37	0,047	0,24	6,8	210	0,023	4	0,041	0,18	0,03	0,03	3,7	0,84	0,84	0,025
32	ZR-020	*S*	0,6	0,46	8,8	490	120	0,16	5,4	5,8	170	0,046	14	0,22	0,36	0,05	0,06	9,9	1,1	1	0,035

Примечание. Функциональные зоны: *I* – промышленная; *S* – селитебная; *R* – природно-рекреационная; *B* – фоновая.

Приложение 6. Содержание ТММ в ассимилирующих органах древесных растений в зоне влияния ГОК «Эрдэнэт»

№	Точка	Функциональная зона	Содержание ТММ в органах древесных растений (мг/кг)																	
			V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
Листья гибридного тополя (Populus)																				
1	E-10-01	*Sm*	< 0,6	0,93	62	130	0,51	0,43	11	43	< 0,05	260	0,66	0,086	0,10	0,03	27	0,24	0,35	0,006
2	E-10-02	*Sm*	< 0,6	1	60	200	0,34	0,65	20	87	0,092	130	0,54	0,17	0,10	0,02	24	0,2	0,44	0,007
3	E-10-03	*Sm*	< 0,6	0,93	52	180	0,37	2	12	58	< 0,05	170	0,52	0,36	0,09	0,02	16	0,18	0,38	0,004
4	E-10-04	*Sm*	<0,6	0,92	85	280	0,46	0,82	12	53	0,11	220	0,72	0,19	0,11	0,05	25	0,17	0,45	0,007
5	E-10-05	*Sm*	< 0,6	0,96	94	120	0,46	0,72	8,1	140	0,13	220	1,6	0,17	0,09	0,01	30	0,18	0,29	0,004
6	E-10-06	*Sm*	< 0,6	0,7	96	120	0,55	0,78	8	26	< 0,05	220	0,33	0,15	0,10	0,01	25	0,2	0,58	0,015
7	E-10-07	*Sm*	< 0,6	0,88	75	190	0,9	1,1	17	84	0,075	290	0,92	0,12	0,37	0,02	25	0,17	0,23	0,003
8	E-10-08	*Sm*	< 0,6	1,2	71	290	0,54	1,4	14	35	0,17	240	1	0,14	0,09	0,03	37	0,14	0,47	0,005
9	E-10-09	*Ss*	< 0,6	1,3	63	290	0,66	0,67	9,1	110	<0,05	110	0,89	0,12	0,09	0,01	17	0,22	5,4	0,005
10	E-10-10	*Ss*	< 0,6	0,69	86	150	1	3,2	11	63	< 0,05	96	1,2	0,44	0,09	0,03	12	0,27	0,41	0,016
11	E-10-13	*Ss*	< 0,6	1,3	70	170	0,43	0,82	8	81	< 0,05	180	0,49	0,21	0,12	0,02	16	0,28	0,56	0,006
12	E-10-14	*Sm*	< 0,6	0,81	54	150	0,28	0,51	8,6	60	< 0,05	190	0,78	0,2	0,10	0,02	29	0,25	0,3	0,005
13	E-10-15	*Sm*	< 0,6	0,65	89	160	0,94	2	16	140	< 0,05	170	0,63	0,37	0,09	0,01	22	0,23	0,22	0,004
14	E-10-16	*I*	< 0,6	1,1	51	92	0,65	3	15	130	< 0,05	210	0,55	0,38	0,09	0,01	21	0,22	0,13	0,011
15	E-10-17	*I*	< 0,6	0,93	240	140	1,6	4,7	11	78	< 0,05	95	0,53	0,27	0,09	0,02	7,9	0,2	0,52	0,004
16	E-10-18	*I*	< 0,6	1,9	71	630	1,1	5,7	32	72	0,58	160	2,3	0,26	0,15	0,11	16	0,32	1,4	0,023
17	E-10-19	*I*	< 0,6	0,93	40	110	0,85	6,8	22	65	0,1	110	2,7	0,27	0,10	0,02	6,2	0,24	0,46	0,005
18	E-10-20	*Sm*	< 0,6	0,95	95	160	1,1	2,7	14	110	< 0,05	300	0,77	0,28	0,11	0,01	37	0,23	0,22	0,003
19	E-11-23	*Ss*	0,33	1,1	140	190	0,66	1	5,7	65	0,051	110	2,4	0,43	0,06	0,15	16	0,023	0,44	0,0018
20	E-11-48	*Ss*	0,17	0,91	53	120	0,28	0,85	5,4	49	< 0,01	210	0,75	0,1	0,04	0,17	21	0,021	0,18	0,0016
21	E-11-58	*Ss*	0,25	1,1	51	150	0,4	1,6	6,7	59	0,059	220	0,83	0,17	0,06	0,21	22	0,019	0,18	0,0019
22	E-11-65	*Sm*	0,16	0,52	36	86	0,31	0,94	4,5	40	0,11	120	0,7	0,043	0,05	0,01	8	0,028	0,17	0,0021
23	E-11-73	*Ss*	0,086	0,4	51	78	0,45	0,79	6,3	46	0,032	99	0,63	0,046	0,05	0,0068	7,4	0,026	0,17	0,0016
24	E-11-105	*Sm*	0,12	0,99	43	100	0,25	1,2	6,3	42	0,052	190	1,1	0,22	0,04	0,17	13	0,03	0,2	0,0022
25	E-11-128	*I*	0,17	0,97	76	120	0,37	0,91	6	54	0,092	220	3,4	0,2	0,04	0,28	13	0,037	0,17	0,0018
26	E-11-132	*I*	0,13	0,83	65	98	0,33	0,53	5,1	47	< 0,01	180	0,96	0,2	0,03	0,13	7,7	0,021	0,12	0,0011

№	Точка	Функциональная зона	Содержание ТММ в органах древесных растений (мг/кг)																	
			V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
27	E-11-192	*Sm*	0,38	0,99	62	190	0,6	1	5,7	26	0,077	180	0,98	0,078	0,05	0,02	14	0,077	0,2	0,0022
28	E-11-193	*Sm*	0,78	5,5	62	370	0,4	0,98	8,1	79	0,098	160	1,6	0,34	0,07	0,19	21	0,045	0,38	0,0043
29	E-11-149	*I*	0,55	1,2	38	260	0,32	1,1	6,4	48	0,094	160	1,5	0,18	0,05	0,17	17	0,077	0,31	0,0044
Хвоя лиственницы сибирской (Lárix sibírica Ledeb.)																				
1	E-10-01	*Sm*	0,79	< 1	70	290	0,16	0,71	7,7	17	0,17	83	0,38	0,009	< 0,003	0,08	29	< 0,4	0,47	0,005
2	E-10-09	*Ss*	2,5	< 1	32	840	0,45	1,7	9,7	15	0,36	76	0,42	0,01	< 0,08	0,05	34	< 0,4	2,1	0,011
3	E-10-11	*Ss*	0,75	< 1	52	260	0,13	0,66	7,5	22	0,11	99	0,34	0,006	< 0,08	0,03	58	< 0,4	0,51	0,005
4	E-10-14	*Sm*	0,65	< 1	19	250	0,11	0,51	7	15	0,1	47	0,28	0,005	< 0,08	0,03	26	< 0,4	0,41	0,007
5	E-10-17	*I*	1,4	< 1	410	470	0,35	2,2	17	15	0,35	62	0,69	0,04	< 0,08	0,05	13	< 0,4	1,2	0,009
6	E-10-18	*I*	2	< 1	130	650	0,36	1,4	30	17	0,58	74	2	0,025	< 0,08	0,13	21	< 0,4	1,2	0,016
7	E-10-20	*Sm*	0,45	< 1	12	180	0,091	0,48	5,4	21	0,095	77	0,2	0,003	< 0,08	< 0,007	33	< 0,4	0,27	< 0,001
8	E-11-19	*Ss*	0,9	1,2	95	370	0,19	1,2	4,1	8,3	0,19	68	0,41	0,012	0,08	0,24	41	0,042	0,54	0,0071
9	E-11-28	*Ss*	1,6	1,6	32	590	0,3	1,4	5,1	9,1	0,23	110	0,46	0,014	0,12	0,21	45	0,1	1,1	0,0073
10	E-11-44	*Sm*	0,33	0,96	43	190	0,074	0,44	4,3	8,1	0,1	58	0,4	0,015	0,06	0,12	19	0,021	0,3	0,0032
11	E-11-45	*Sm*	0,62	0,52	13	280	0,12	0,47	4,7	6,7	0,14	41	0,34	0,0087	0,08	0,03	22	0,037	0,52	0,0043
12	E-11-76	*B*	0,33	0,8	130	170	0,13	0,95	4,3	9,4	0,044	100	0,22	0,014	0,05	0,20	57	0,017	0,22	0,0026
13	E-11-77	*B*	0,38	0,47	140	180	0,13	0,53	5,2	8,8	0,095	77	0,44	0,012	0,07	0,02	37	0,031	0,41	0,0058
14	E-11-93	*B*	0,38	0,63	140	180	0,12	0,65	4,7	9,1	0,077	73	0,27	0,011	0,04	0,19	71	0,025	0,22	0,0026
15	E-11-101	*B*	0,21	0,63	110	120	0,11	0,65	3,8	7	0,045	94	0,21	0,0085	0,05	0,17	40	0,012	0,17	0,0022
16	E-11-124	*B*	0,31	0,65	87	140	0,12	1,1	3,8	8,7	0,035	92	0,2	0,0070	0,04	0,19	38	0,017	0,18	0,0021
17	E-11-139	*Ss*	0,24	0,4	71	130	0,094	0,33	3,7	7,6	0,06	92	0,34	0,0096	0,04	0,0079	35	0,025	0,19	0,0023
18	E-11-150	*I*	0,4	0,4	28	190	0,092	0,56	11	9,7	0,21	85	1,2	0,015	0,06	0,03	68	0,034	0,46	0,0052
19	E-11-154	*B*	0,3	1,2	150	150	0,15	1,4	11	12	0,14	170	1,2	0,014	0,09	0,16	120	0,13	0,32	0,0057
20	E-11-182	*I*	0,3	0,73	250	170	0,17	1,8	18	11	0,33	120	3,3	0,019	0,05	0,25	100	0,035	0,39	0,0063

Примечание. Функциональные зоны: *I* – промышленная; *Sm* и *Ss* – селитебные с многоэтажной и одноэтажной (юрточной) застройкой соответственно; *B* – фоновая.