

ГЕОГРАФИЯ И ЭКОЛОГИЯ

УДК 631.44.06; 504.06

Н.Е. Кошелева¹, И.В. Тимофеев², Н.С. Касимов³**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ПОЧВЕННЫХ КАТЕНАХ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ПРИМЕРЕ ЗАКАМЕНСКА (РОССИЯ) И ЭРДЭНЭТА (МОНГОЛИЯ)**

По результатам почвенно-геохимических исследований 2011–2013 гг. установлены уровни содержания 16 тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) I–III классов опасности в городских и фоновых катенах гг. Закаменск (Россия) и Эрдэнэт (Монголия). Геохимическая структура фоновых катен в горнопромышленных центрах определяется высокой литогеохимической неоднородностью почвообразующих пород, наибольшие концентрации Ba, Sb, Cd, Mo, Zn, Cu, Ni, Co в районе развития Джидинского и Эрдэнэтского рудных узлов приурочены к слабо развитым горным почвам автономных ландшафтов. Разработка месторождений обусловила резкий рост контрастности латерального распределения ТММ с накоплением халькофильных элементов Mo, Bi, W, Sb, Cu, As, Cd, Pb, Sn в супераккумулятивных позициях Закаменска и Cu, Mo, Sb, As в трансаккумулятивных позициях Эрдэнэта. Разрушение хвостохранилищ современными эрозионными процессами стало причиной формирования природно-техногенного сорбционно-седиментационного латерального геохимического барьера, на котором при увеличении содержания физического песка в Закаменске и ила в Эрдэнэте концентрируются рудные элементы Mo, W, Cu в подчиненных ландшафтах.

Ключевые слова: приоритетные поллютанты, хвостохранилище, физико-химические свойства, геохимические барьеры, горнопромышленные центры

Введение. Промышленная разработка полезных ископаемых относится к самым значительным глобальным экологическим проблемам [Ericson, Hanrahan, Kong, 2014], так как она сопровождается вовлечением в миграционные потоки больших количеств тяжелых металлов и металлоидов (ТММ), оказывающих токсичное влияние на живые организмы. Негативные последствия добычи цветных металлов изучаются во многих регионах мира [Авдонин, 1984; Авессаломова, 2004; Елпатьевский, 1993; Крупская с соавт., 2017; Опекунов, Опекунова, 2013; Саэт с соавт., 1990; Anawar et al., 2011; Gomez-Alvarez et al., 2007; Li et al., 2014; Mileusnic et al., 2014; Moncur et al., 2005]. Особое внимание уделяется пространственному и профильному распределению различных форм ТММ в почвах, как основной депонирующей среде [Семячков, Почечун, 2016; Тимофеев, Касимов, Кошелева, 2016; Gomez-Alvarez et al., 2007], выделению ассоциаций химических элементов с различным поведением в почвах, отвалах и хвостохранилищах [Елпатьевский, 2003; Удачин, Ершов, 1995; Anawar et al., 2011]; геохимической характеристике хвостохранилищ, в том числе процессов современного минералообразования и воздействия на прилегающие почвы [Бортников с соавт., 2015; Смирнова, Сарапулова, Цыренова, 2010;

Ханчук, Крупская, Зверева, 2012; Юргенсон, Смирнова, Меркулов, 2008; Mileusnic et al., 2014; Moncur et al., 2005], оценке здоровья населения в горнопромышленных центрах [Li et al., 2014]. Активно изучается пространственное распределение поллютантов. Однако значительная часть ТММ мигрирует по почвенному профилю и перераспределяется в зависимости от рельефа и ландшафтно-геохимических условий, что может расширить зону загрязнения от горнообогатительных комбинатов.

Для изучения миграции и аккумуляции ТММ целесообразно использовать катенарный подход. Условия и механизмы образования зон аккумуляции в катенах могут быть установлены на основе теории геохимических барьеров (ГХБ), понятие о которых сформировалось в гипергенной геохимии и геохимии ландшафтов [Перельман, Касимов, 1999; Саэт с соавт., 1990; Fortescue, 1980]. Под барьерами понимают участки земной коры, где на коротком расстоянии резко уменьшается интенсивность миграции химических элементов, что приводит к их концентрации [Глазовская, 2012; Перельман, Касимов, 1999]. Свойства этих барьеров в значительной степени определяют дальнейшую судьбу ТММ. Анализ содержания ТММ в почвенных катенах совместно с природными и антропогенными факторами

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геогр. н.; *e-mail:* natalk@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail:* vano-timofeev@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, президент факультета, академик РАН, докт. геогр. н.; *e-mail:* info@geogr.msu.ru

их накопления дает возможность определить условия и механизмы формирования ГХБ по комбинации факторов, при которых наблюдается максимальная аккумуляция ТММ в почвах [Кошелева, Касимов, Власов, 2015]. Приуроченность ГХБ к тому или иному элементарному ландшафту зависит от геохимической обстановки и физико-химических свойств почв: кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий, содержания органического вещества и легкорастворимых солей, доли ила и емкости поглощения.

Цель данной работы – оценить условия латеральной миграции ТММ и выявить участки их аккумуляции в почвенных катенах горнопромышленных центров Закаменск (Республика Бурятия) с градообразующим предприятием Джидинский вольфрам-молибденовый комбинат (ДВМК), и Эрдэнэт (Монголия) с Эрдэнэтским медно-молибденовым комбинатом (ЭММК). Решались следующие задачи:

- установить уровни содержания ТММ в поверхностных горизонтах фоновых почв и приоритетные элементы-загрязнители городских почв в различных родах элементарных геохимических ландшафтов;
- охарактеризовать латеральную дифференциацию и контрастность геохимических аномалий ТММ в фоновых и городских катенах;
- выявить ведущие почвенно- и ландшафтно-геохимические факторы накопления ТММ в гумусовых горизонтах катен и по их сочетанию диагностировать латеральные ГХБ.

Объекты исследования. Природные условия.

Горнопромышленные центры расположены в бассейне крупнейшей впадающей в оз. Байкал р. Селенги (рис. 1), в условиях резко континентального климата с холодной зимой и теплым, влажным летом, когда выпадает 60–70% годовой суммы осадков. В Закаменске преобладают ветры западного и северо-западного направлений, нередко инверсии и застои воздуха, что способствует его загрязнению и низкому уровню самоочищения. В Эрдэнэте наиболее часты северо-западные и северные ветры.

Закаменск с площадью 45 км² находится в 460 км к юго-западу от г. Улан-Удэ в южной части Монголо-Сибирского горного пояса, в сильнорасчлененной долине р. Модонкуль с относительными высотами водораздельных гребней над тальвегами до 300–400 м [Зиновьева с соавт., 2011]. В автономных позициях и на крутых склонах развиты горные дерново-таежные и серые лесные почвы под березой плосколистной (*Bétula platyphýlla Sukacs*⁴) и лиственницей сибирской (*Lárix sibirica Ledeb.*) с подлеском из рододендрона даурского (*Rhododendron dauricum L.*) и шиповника иглистого (*Rosa acicularis Lindl.*). На нижних частях склонов под луговой и лугово-болотной растительностью распространены дерновые лесные почвы [Ногина, 1964], а вдоль русла р. Модонкуль – аллювиально-гумусовые [Убугунов с соавт., 2012].

Эрдэнэт с площадью 180 км² располагается на междуречье рр. Селенги и Орхона в 340 км к северо-западу от г. Улан-Батор в Орхон-Селенгинском прогибе Селенгино-Витимского вулканического пояса [Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010]. Территория представляет собой полого-холмистую долину р. Эрдэнэтий-Гол в зоне горных степей и лесов, где чередование леса и степи определяется горным рельефом местности и экспозицией склонов [Востокова, Гунин, 2005; Юнатов, 1950].

На вершинах склонов под лиственничными природными лесами развиты почвы темно-каштанового типа. На темно-каштановых слабозасоленных, солонцеватых, глубокосолонцеватых и несолонцеватых почвах склонов произрастает полынно-разнотравно-злаковая растительность, представленная тонконогом гребенчатым (*Koeleria pyramidata Lam.*), мятликом кистевидным (*Poa botryoides Trin. ex Griseb.*), тырсой (*Stipa capilláta L.*), полынью холодной (*Artemisia frigida Willd.*) и др. [Востокова, Гунин, 2005]. В поймах рек в виде узкой полосы распространены лугово-каштановые и луговые слабозасоленные суглинистые почвы [Карпель с соавт., 1975]. В городе растительность состоит из посадок лиственниц и тополей (род *Populus*), а травянистый покров практически отсутствует вследствие интенсивного выпаса скота.

Техногенное воздействие. В Закаменске с 1934 по 2001 гг. открытым карьерным и шахтным способами разрабатывалось штокверковое молибденовое (Первомайское), сульфидно-вольфрамовые (Инкурское и Холтосонское рудные и россыпные) и золотоносные (Мыргэншено, Ивановка) месторождения. Помимо W, Mo и Au руды содержали токсичные элементы-примеси – Pb, Zn, F, Mo, W, Be, Bi, As, Cu, Cd, V [Зиновьева с соавт., 2011; Смирнова, Плюснин, 2013]. Отходы добычи и производства складировались в хвостохранилищах: 44,5 млн тонн отходов размещены в Джидинском насыпном, Барун-Нарынском гидроотвале путем перегораживания плотинной р. Барун-Нарын и аварийном, при рекультивации которого в 2011 г. было перемещено 3,5 млн тонн отходов в верхнюю часть Барун-Нарынского хвостохранилища. Из-за высокого содержания Mo и W в отходах ДВМК ЗАО «Закаменск» с 2010 г. ведет их доизвлечение с формированием нового места складирования отходов в долине р. Зун-Нарын. Помимо градообразующего предприятия здесь функционирует городская ТЭЦ, использующая мазут, ведется заготовка и переработка древесины, литье чугуна, стали, бронзы, обработка камней, производятся строительные материалы и продовольственные товары.

В Эрдэнэте с 1976 г. по настоящее время ЭММК ведет добычу открытым карьерным способом из Mo-Cu порфирового месторождения, руды которого содержат промышленные концентрации Re, Ag, Se и повышенные концентрации Pb, Zn, As, Sr, Bi, Co,

⁴ Здесь и далее латинские названия даны по С.К. Черепанову [1995].

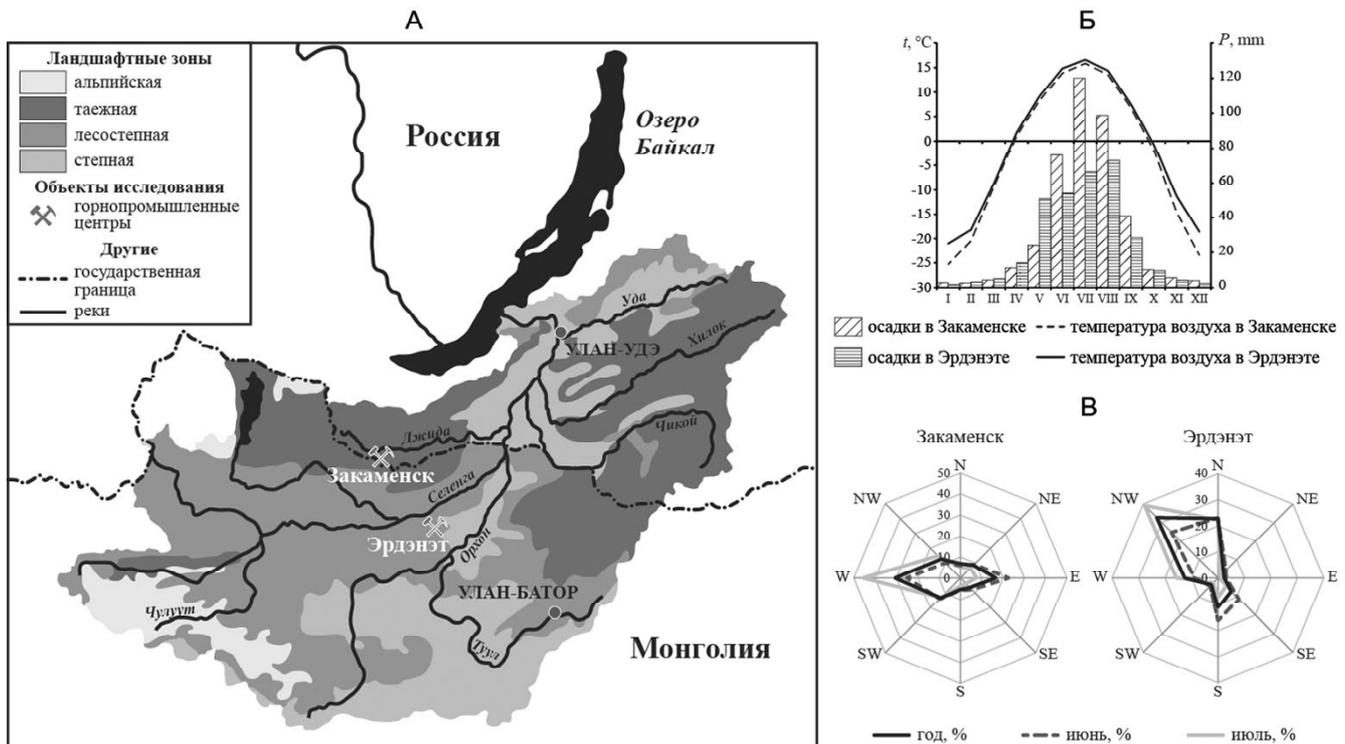


Рис. 1. Объекты исследования (А); средние за 1940–2015 гг. метеорологические показатели по метеостанциям Цакир (Россия) и Булган (Монголия): годовые колебания среднемесячной температуры воздуха (t) и слоя осадков (P) (Б); розы ветров (В) (по данным [Булыгина, Разуваев, Александрова, 2014; KNMI, 2016])

Fig. 1. Study objects (A); mean meteorological parameters (averaged for the period from 1940 to 2015 for meteorological stations Tsakir in Russia, and Bulgan in Mongolia: t – mean monthly air temperature and P – precipitation (B); wind roses (B) (data from [Bulygina, Razuvaev, Aleksandrova, 2014; KNMI, 2016])

Ni, Ge, Ta, Ga, In, Cd [Гаврилова, Максимюк, Орлова, 2010]. Ежегодно производится около 530 тыс. т Cu и 4,5 тыс. т Mo концентрата, всего изъято более 440 млн м³ горной массы [Erdenet Carpet, 2015]. Эрдэнэтское хвостохранилище занимает более 1500 га в долине р. Зуна-Гол, где создана плотина высотой более 85 м. К источникам загрязнения городских ландшафтов относится Эрдэнэтская ТЭЦ, использующая бурый уголь из разрезов Шарынгол и Баганур. Как и большинство сернистых углей, он обогащен халькофильными элементами As, Bi, Mo, Sb, W и др. Рядом размещено «Эрдэнэт Хивс» – предприятие по производству шерстяных ковров, одежды из овечьей и верблюжьей шерсти, кашемира и войлока.

В жилебной и промышленных зонах горнопромышленных центров произошли значительные изменения природных почв: верхний горизонт представляет собой насыпной перемешанный и прогумусированный слой с примесью строительного-бытового мусора, промышленных отходов и диагностируется как «урбик» [МРФ, 2017; Почва ..., 1997; Классификация ..., 2004]. Обширные площади занимают техногенные поверхностные образования (ТПО): токсифабрикат, которые состоят из насыпного токсичного материала мощностью от 0,2 до 3 м; экраноземы – запечатанные почвы, залегающие под асфальтобетонным покрытием; реплантоземы и

урбикквиземы – вновь созданные на газонах вдоль дорог. Вокруг хвостохранилищ формируются арти- и токсиндустраты, в профиле которых присутствуют искусственные насыпные горизонты из нетоксичного и токсичного материалов, соответственно.

Материалы и методы. Почвенно-геохимическая съемка г. Закаменска проводилась летом 2013 г. Заложено 8 катен через долину р. Модонкуль на расстоянии 0,5–1,5 км друг от друга (рис. 2,А): 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 хвостохранилища; V–VII – через природно-рекреационную и жилебную зоны на левом берегу р. Модонкуль и техногенное Модонкульское месторождение; VIII – фоновая, в долине пересыхающей в летний период р. Зимки, расположенной в тех же геологических условиях, что и территория города. В г. Эрдэнэте летом 2012 г. было опробовано 6 катен (рис. 2,Б): I – на правом берегу р. Эрдэнэтский-Гол от ЭММК; II – на левом берегу р. Эрдэнэтский-Гол; III и IV – на левом и правом бортах хвостохранилища; V – на левом берегу р. Гавелын-Гол; VI – фоновая, в 10 км юго-западнее города. Всего в г. Закаменске отобрана 31 проба, в Эрдэнэте – 15 проб из верхнего гумусово-аккумулятивного горизонта А1. Образцы отбирались в четырех основных родах элементарных

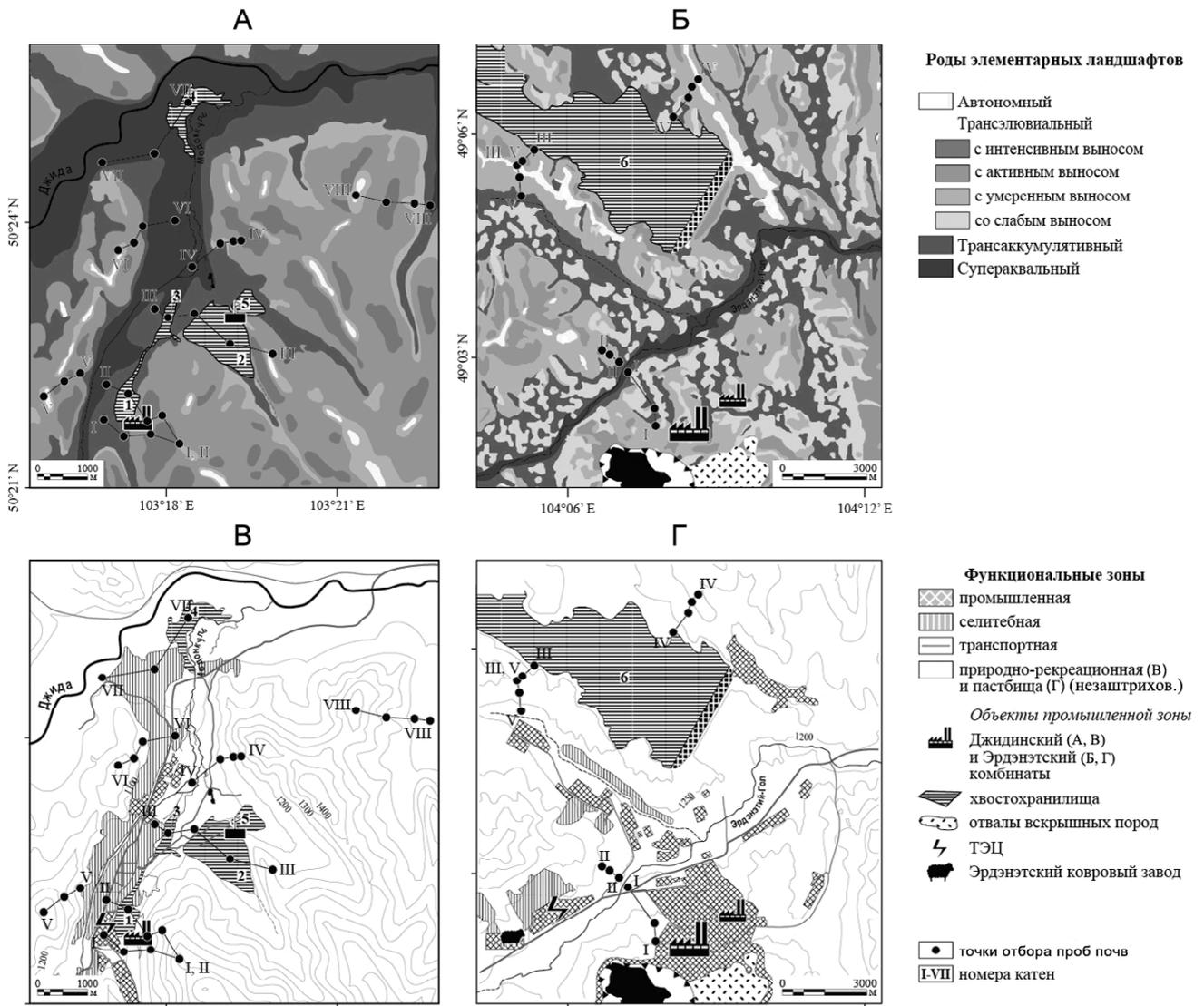


Рис. 2. Карта родов элементарных ландшафтов (А, Б) и функционального зонирования (В, Г) scheme: А, В – г. Закаменска, Б, Г – г. Эрдэнэта. Хвостохранилища: 1 – Джидинское, 2 – Барун-Нарынское, 3 – аварийное, 4 – Модонкульское, 5 – Зун-Нарынское, 6 – Эрдэнэтийское
 Fig. 2. Genera of elementary landscapes (А, Б) and land-use zoning (В, Г) scheme: А, В – for the town of Zakamensk, Б, Г – for the town of Erdenet. Tailing dumps: 1 – Dzidinskoe, 2 – Barun-Naryn, 3 – emergency, 4 – Modonkul, 5 – Zun-Naryn, 6 – Erdenet

ландшафтов [Перельман, Касимов, 1999]: автономном (А), транэлювиальном (ТЭ), трансаккумулятивном (ТА) и супераквальном (СА), которые выделены путем анализа цифровой модели рельефа территорий [Хайбрахманов, Тимофеев, Кошелева, 2015]. В соответствии с [Богданова, Гаврилова, Герасимова, 2012] транэлювиальные ландшафты склонов подразделены на четыре градации в зависимости от крутизны склонов: со слабым (пологие 2–5°), умеренным (средней крутизны 5–10°), активным (крутые 10–20°), интенсивным (очень крутые >20°) выносом.

При функциональном зонировании территорий изучаемых горнопромышленных центров выделены пять зон (рис. 2 В, Г): две селитебных – с многоэтажной и одноэтажной (дачной в Закаменске и юрточной в Эрдэнэте) застройкой; промышленная (ГОКи, отвалы вскрышных пород, хвостохранили-

ща, иные предприятия); транспортная (автомобильные дороги с асфальтовым и грунтовым покрытием); природно-рекреационная (Закаменск) и пастбищ (Эрдэнэт). Наибольшую площадь занимают пастбища и рекреации, окружающие городские постройки по периметру, а также являющиеся буферными участками между другими функциональными зонами. Основные источники загрязнения размещаются в промышленной зоне, они приурочены преимущественно к подчиненным ландшафтам: ДВМК и ЭММК – к транэлювиальным со слабым выносом, хвостохранилища и ТЭЦ в обоих горнопромышленных центрах – к трансаккумулятивным.

В почвенных образцах определены основные физико-химические свойства: актуальная кислотность (рН) потенциометрическим методом в водной суспензии (рН-метр рН340i/set); содержание органического углерода методом И.В. Тюрина с

титриметрическим окончанием; гранулометрический состав – методом лазерной дифракции (гранулометр «Analysette 22. Laser klasse 1» фирмы Fritsch). Гранулометрические фракции частиц выделены согласно классификации Н.А. Качинского [1958]. Содержание органического углерода пересчитывалось в почвенное органическое вещество (ПОВ) с помощью коэффициента 1,724.

Валовое содержание 53 ТММ в пробах почв анализировалось масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами с индуктивно-связанной плазмой во ВНИИ минерального сырья имени Н.М. Федоровского. Для анализа использовались квадрупольные масс-спектрометры Elan-6100 и Optima-4300 (Perkin Elmer, USA). Содержание Mn и Fe определено атомно-эмиссионным методом с индуктивно-связанной плазмой. Для подробного анализа выбраны 16 химических элементов, типичных для Mo-W и Cu-Mo месторождений [Сагт с соавт., 1990; Тимофеев с соавт., 2014; Тимофеев, Касимов, Кошелева, 2016; Kosheleva, Kasimov, Timofeev, 2017; Timofeev, Kosheleva, 2017], обладающих высокой токсичностью для живых организмов и способных к биоаккумуляции. За исключением Sn и Bi, 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].

ТММ в фоновых пробах C_{ϕ} группировались в зависимости от положения в катене и сравнивались с кларками литосферы C путем расчета кларков концентрации $KK=C_{\phi}/C$ и рассеяния $KP=C/C_{\phi}$. В качестве эталонов сравнения использовались оценки различных авторов: для Sb, Ni, Cr, As, Zn, Pb, Sr, W – Н.А. Григорьева [2009], для Bi, V, Co, Cu–Zn, Hg, S, Gao [2008], для Mo, Cd, Ba – R.L. Rudnick, S. Gao [2003], для Sn – Wedepohl [1995].

Геохимическая трансформация городских почв оценивалась в зависимости от их положения в катенах: локальные коэффициенты концентрации $K_c=C_a/C_{\phi}$ и рассеяния $K_p=C_{\phi}/C_a$ элементов, где C_a – концентрация элемента в городских образцах, рассчитывались относительно фоновых, расположенных в аналогичном элементарном геохимическом ландшафте.

Контрастность распределения ТММ в катене характеризовалась коэффициентом латеральной дифференциации L , равным отношению содержания элемента в рассматриваемом ландшафте к его концентрации в автономном. Коэффициент L рассчитывался для поверхностного гумусово-аккумулятивного горизонта ненарушенных и городских почв. Этот слой представляет собой самую уязвимую часть профиля почвы и наиболее важную при оценке ее экологических функций [Терехина, 2010]. На основе анализа различных классификаций распределения вещества и ТММ в почвенных катенах [Гаврилова, Касимов, 1989; Геннадиев, Жидкин, 2012; Касимов, Самонова, 2004; Sommer, Schlichting, 1997] выделены следующие типы латерально-миграционной дифференциации ТММ: 1) вне-аккумулятивный – при отсутствии выраженных зон аккумуляции в пределах катены; 2) верхне-, 3) срединно- и 4) нижне-аккумулятивные типы –

при локализации зон аккумуляции в автономных, трансэлювиальных или трансаккумулятивных и супераккумулятивных ландшафтах соответственно.

Природные и антропогенные факторы накопления ТММ в поверхностном горизонте городских почв, представленные количественными и качественными переменными, определены путем построения в пакете SPLUS (MathSoft®, 1999) регрессионных деревьев. Этот метод заключается в последовательном делении таблицы с ландшафтно-геохимическими данными по одному из факторов на две части таким образом, чтобы каждая из них была максимально однородной по содержанию ТММ [Кошелева, Касимов, Власов, 2015; Rawls, Pachepsky, 2002]. Диагностика латеральных геохимических барьеров (ЛГХБ) выполнена на основе классификации [Перельман, Касимов, 1999] с дополнениями [Глазовская, 2012].

Результаты и их обсуждение. Геохимическая структура фоновых катен. Гранулометрический состав всех фоновых почв вблизи г. Закаменска характеризуется содержанием физического песка (частицы размером 0,01–1 мм, согласно [Качинский, 1958]) 70–77%, физической глины (менее 0,01 мм) 20–28%, ила (менее 0,001 мм) 2–2,8%. В автономных ландшафтах горные дерново-таежные почвы на плагиогранитах, гранодиоритах и диоритах Джидинского палеозойского комплекса имеют маломощный профиль 25–35 см, слабокислую-нейтральную реакцию среды (pH 5,4–5,7), среднее содержание ПОВ в гумусово-аккумулятивных горизонтах (5–6%). В профиле присутствует большое количество обломков гранитов, гранодиоритов, граносиенитов, туфов, ортофиринов, кератофиринов, обогащенных рудными и элементами-спутниками [Смирнова, Плюснин, 2013], с накоплением Cd, Pb, Mo, W, Bi, Zn и Ba ($KK=1,8–9,9$) (табл. 1). В трансэлювиальных и трансаккумулятивных ландшафтах серые лесные почвы мощностью 30–100 см имеют слабокислую реакцию среды (pH 5,1–4,9) и содержание ПОВ до 7%. Они характеризуются незначительным накоплением только V ($KK=1,3$).

В подчиненных (ТА, СА) ландшафтах развиты аллювиальные (темно-)гумусовые слоистые почвы мощностью 80–100 см, с нейтральной реакцией (pH 6,6–7,2) среды, повышенным содержанием ПОВ (до 15%) и валового Fe, восстановительными условиями и среднесуглинистым гранулометрическим составом. Эти условия способствуют выносу Cr, Cu, Sn, Zn, V, Pb, Ni, Ba, Co, Sb ($KP=1,6–4,8$) и сильному снижению подвижности As ($KK=11,4$) путем его фиксации ПОВ и сорбции глинистыми частицами. Подобные особенности поведения As не раз отмечались в других работах [Gough et al., 2006; Kabata-Pendias, 2011; Violante et al., 2008].

Поверхностные горизонты фоновой катены имеют верхне-аккумулятивный тип распределения с наибольшими концентрациями в автономных ландшафтах всех элементов, за исключением V, Cr, As, Sr и Sn (рис. 3). Это обусловлено природными ус-

ловиями: на водоразделах почвы на кристаллических породах имеют малую мощность с большим количеством обломков почвообразующих пород и слабую вариабельность физико-химических свойств ($C_v=4-20\%$), что не способствует перераспределению ТММ в пределах катены. V, Cr и Sn имеет слабовыраженный срединно-аккумулятивный тип дифференциации, а As и Sr – ниже-аккумулятивный, с накоплением в подчиненных ландшафтах.

В автономных ландшафтах вблизи г. Эрдэнэта формируются горные каштановые почвы [Министерство ..., 1977] на породах среднепермского Селенгинского комплекса с нейтральной реакцией среды (pH 7,1–7,2), ПОВ в верхних горизонтах достигает 4,1%. В трансэлювиальных позициях светло-каштановые почвы близки по свойствам к автономным почвам – pH 7,2–7,5, ПОВ до 3,9%. В трансаккумулятивных позициях на четвертичных отложениях развиты темно-каштановые почвы, представляющие собой комплекс чередующихся слоистостей каменных обломков различных размеров (от 1 до 25 см в диаметре) с мелкоземом. Реакция среды – слабощелочная, мощность профиля варьирует от 60 до 100–110 см, ПОВ 2,5–3%. Гранулометрический состав всех фоновых почв характеризуется содержанием физического песка 72–77%, физической глины 19,5–25,2%, ила 2,8–3,5%. Супераквальные позиции заняты аллювиальными луговыми и аллювиальными дерновыми почвами.

В отличие от фоновых почв вблизи г. Закаменска, в районе г. Эрдэнэта содержания практически всех ТММ близки к кларкам, за исключением Sr и Cd с повышенными концентрациями во всех геохимических позициях (рис. 3). Наибольшее содержание Sr, Co, V ($KK=1,7-3$) характерно для фоновых почв автономных ландшафтов (табл. 1), наследующих микроэлементный состав почвообразующих пород [Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010]. Так, содержание Sr в гранодиоритах, гранодиорит-порфирах и адамеллит-порфирах в районе Эрдэнэского месторождения составляет 1150–810 мг/кг, что в 3,7–2,7 раза превышает кларк кислых пород, и соответствует содержанию в районах Мо-Су месторождений порфирирового типа [Кривцов с соавт., 2001]. Почвы трансэлювиальных и трансаккумулятивных позиций обогащены Cd и As ($KK=1,9$ и $2,5$ соответственно).

Латеральная дифференциация Cd в почвах фоновой катены относится к срединно-аккумулятивному типу распределения с накоплением в трансаккумулятивных ландшафтах, Bi, As и W – к ниже-аккумулятивному, Pb, Sn – к вне-аккумулятивному, а всех остальных – к выше-аккумулятивному (рис. 3), что свидетельствует о слабой интенсивности процессов латеральной миграции в семиаридных ландшафтах при отсутствии техногенного воздействия. Различия между элементарными геохимическими ландшафтами невелики, значения L для всех ТММ находятся в диапазоне 0,5–1,9.

Таким образом, геохимическая структура почв фоновых катен вблизи гг. Закаменска и Эрдэнэта обусловлена влиянием и петрохимическими особен-

ностями вулканических пород – гранодиоритов, гранитов и габбро. В районе развития Джидинского рудного узла в гумусовых горизонтах почв наибольшие концентрации Bi, Pb, W, Ba, Sb, Cd, Mo, Zn, Cu, Ni, Co приурочены к автономным ландшафтам со слабо развитыми каменными почвами. Подобное свойственно Ba, Sb, Mo, Sr, Zn, Cu, Ni, Co, Cr в пределах развития Эрдэнэского рудного поля. Мышь-як, Sr, Cr, V, Sn вблизи г. Закаменска и As, W, Cd вблизи г. Эрдэнэта накапливаются в средней и нижней частях склонов за счет фиксации глинистым и органическим веществом. Содержание ПОВ увеличивается при смене окислительных условий на восстановительные в супераквальных позициях.

Геохимическая структура городских катен.

Техногенное воздействие привело к наибольшему изменению физико-химических свойств почв в подчиненных ландшафтах г. Закаменска. Из-за близости хвостохранилищ происходит подкисление поверхностных горизонтов почв в трансаккумулятивных и супераквальных позициях, реакция среды становится сильнокислой (pH=3,4–3,6). Содержание ПОВ уменьшается до 4,5–4,6 и 10,5–11% соответственно. В автономных позициях свойства почв изменяются в наименьшей степени: pH=5,3–5,8, ПОВ – 5,3–7,5%.

В автономных ландшафтах с глубоким залеганием грунтовых вод и поступлением вещества только из атмосферы почвы накапливают Cu, Pb, Zn ($K_c=5,7-8,8$), Bi, W, V, Sb, Cr, Cd, Sn (2,5–4,5). В трансэлювиальных ландшафтах транзит вещества приводит к тому, что локальные коэффициенты концентрации здесь невелики ($K_c=1,6-4,2$). В трансаккумулятивных позициях происходит частичная аккумуляция элементов из автономных и трансэлювиальных ландшафтов, почвы интенсивно накапливают W, Bi, Mo, Sb ($K_c=25-52$) и в меньшей степени As, Cu, Pb, Cd (4,9–5,3). Помимо поступления из вышерасположенных ландшафтов источниками загрязнения здесь являются Джидинское хвостохранилище, ТЭЦ, работающая на мазуте, и завод «Литейщик» по переработке цветных металлов. Выбросы предприятий этого профиля, согласно [Касимов с соавт., 2016; Новоселов, 1983; Сагс с соавт., 1990; Benin et al., 1999; Расуна et al., 2007], содержат W, Sb, Mo, Pb, Cu и др. Источником ТММ может служить также дорожно-транспортная сеть. В выбросах автотранспорта содержится широкий набор загрязнителей: в выхлопных газах – Pb, Cu, Sr; в моторном масле – Zn, Pb, Cu, Sb, Mo; при истирании шин в окружающую среду поступают Cd, Zn, Pb, Co, Ni, Cr, Cu, Sb; тормозных колодок – Cu, Sb, Zn, Pb и др. [Касимов с соавт., 2016].

В результате техногенного воздействия латеральная структура катен приобрела совершенно иной характер по сравнению с фоновыми условиями (табл. 1). Конечным «депо» на пути миграции ТММ в катенах являются супераквальные ландшафты, где приоритетными загрязнителями являются халькофильные элементы Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, W, Pb, Bi (рис. 3), концентрации которых на некоторых уча-

Содержание ТММ (мг/кг) в гумусовых горизонтах

Род элементарных ландшафтов	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sr
Фоновая катена								
A	90	62	17	48	35	200	4,6	320
ТЭ	140	64	15	26	15	88	6,8	460
ТА	110	68	10	28	19	55	3,4	430
СА	39	19	7,9	23	5,9	24	64	650
Катены в пределах г.								
A	$\frac{146^*}{90-190}$	$\frac{58,1}{22-89}$	$\frac{17,9}{15-22}$	$\frac{29,9}{13-48}$	$\frac{52}{35-80}$	$\frac{137}{75-270}$	$\frac{5,4}{2,3-9,1}$	$\frac{266}{120-350}$
ТЭ	$\frac{145}{71-190}$	$\frac{65,5}{36-100}$	$\frac{16,2}{9,1-20}$	$\frac{29,6}{21-39}$	$\frac{38,5}{15-61}$	$\frac{94,1}{61-130}$	$\frac{6,2}{4,2-9,9}$	$\frac{341}{230-460}$
ТА	$\frac{108}{23-170}$	$\frac{78}{8,7-130}$	$\frac{12,1}{0,9-17}$	$\frac{35,8}{3-54}$	$\frac{42}{18-95}$	$\frac{124}{36-440}$	$\frac{4,2}{1,3-7,9}$	$\frac{291}{110-430}$
СА	$\frac{62,5}{37-120}$	$\frac{27,5}{7,1-55}$	$\frac{8,8}{0,7-19}$	$\frac{17,1}{4,4-29}$	$\frac{179}{5,9-580}$	$\frac{200}{24-460}$	$\frac{24,6}{5,4-64}$	$\frac{299}{78-650}$
Фоновая катена								
A	190	84	20	46	41	100	5,8	580
ТЭ	190	55	13	30	29	63	9,5	280
ТА	130	53	16	28	29	77	8,6	350
СА	160	63	17	37	35	88	11	340
Катены в пределах								
A	$\frac{193}{170-210}$	$\frac{38,3}{24-53}$	$\frac{12,6}{4,7-17}$	$\frac{23,3}{17-29}$	$\frac{66,3}{42-100}$	$\frac{72,3}{39-99}$	$\frac{9,3}{6,9-11}$	$\frac{420}{180-670}$
ТЭ	$\frac{158}{140-190}$	$\frac{58,8}{50-66}$	$\frac{16,5}{15-20}$	$\frac{35,5}{31-44}$	$\frac{150}{32-640}$	$\frac{84,2}{73-93}$	$\frac{13,5}{7-23}$	$\frac{423}{290-730}$
ТА	$\frac{155}{120-190}$	$\frac{48,8}{39-66}$	$\frac{13,5}{11-16}$	$\frac{25,8}{19-36}$	$\frac{153}{40-480}$	$\frac{84,3}{83-86}$	$\frac{15,3}{8-35}$	$\frac{390}{320-440}$
СА	$\frac{143}{130-150}$	$\frac{54,7}{45-60}$	$\frac{16}{13-18}$	$\frac{28}{25-30}$	$\frac{49}{35-68}$	$\frac{82}{80-85}$	$\frac{10,1}{8,3-11}$	$\frac{360}{300-470}$
Кларки								
	106	92	15	50	27	75	5,6	270

Примечание. Над чертой указано среднее, под чертой – min-max.

стках превышают фоновые в 70–123 раз. Наибольшие значения коэффициентов латеральной дифференциации L характерны для рудных элементов Mo ($L=58,6$) и W (22,4) и их спутников Bi (32,2), Sb (16,6), Cd (11).

В трансаккумулятивных ландшафтах расположены вторичные источники загрязнения в виде складированных отходов ДВМК: Барун-Нарынское, Зун-Нарынское и аварийное хвостохранилища, материал которых обогащен рудными элементами W, Mo и их спутниками Bi, Pb, Cu, Zn, As, Cd, Sb и др. [Смирнова, Плюснин, 2013; Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002]. Размыв Барун-Нарынского хвостохранилища и последующий русловой транспорт слагающего его материала привели к загрязнению высокой

и средней пойм долины р. Модонкуль в северной части города на протяжении 7,5 км. В излучине реки, где направление течения меняется с меридионального на субширотное, в результате отложения на механическом барьере транспортируемого материала сформировалось Модонкульское месторождение техногенных песков мощностью до 2 м и площадью 2,5 км², вытянутое с юго-запада на северо-восток. В разрезе оно имеет тонкую ритмичную, подобную ленточной, слоистость, отражающую периодические крупные разливы в устье р. Модонкуль [Ходанович, 1999]. Материал месторождения обогащен глиной и илом, насыщен сульфидами, содержит повышенные концентрации гюбнерита и шеелита. Переносу сульфидов, а с ними и халькофильных W, Mo, Bi, Sb, Pb,

Таблица 1

Фоновых и городских почв гг. Закаменска и Эрдэнэга

Mo	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Pb	Bi
вблизи г. Закаменска							
5,1	0,89	1,9	1,2	1100	7,6	90	0,69
3,1	0,21	2,6	0,91	1100	5,9	34	0,33
0,99	0,19	1,8	0,59	750	2,4	19	0,26
2,2	0,14	0,76	0,52	310	3,4	7,2	0,22
г. Закаменска (n=5)							
<u>4,5</u>	<u>0,4</u>	<u>1,9</u>	<u>1,8</u>	<u>701</u>	<u>13,6</u>	<u>53,7</u>	<u>1</u>
1 – 10	0,1 – 0,9	1,6 – 2,2	0,7 – 3,7	390 – 1100	2,8 – 53	18 – 160	0,3 – 2,9
<u>5,6</u>	<u>0,3</u>	<u>2,4</u>	<u>1,9</u>	<u>744</u>	<u>10,1</u>	<u>31</u>	<u>0,7</u>
1,1 – 22	0,1 – 0,5	1,4 – 3,4	0,7 – 6,7	290 – 1100	2,4 – 26	18 – 72	0,3 – 2,6
<u>36,6</u>	<u>0,9</u>	<u>3,8</u>	<u>2,5</u>	<u>596</u>	<u>137</u>	<u>91,2</u>	<u>6,9</u>
1 – 270	0,1 – 5,2	1,4 – 9,7	0,6 – 5,7	180 – 750	2,4 – 920	18 – 410	0,3 – 36
<u>264</u>	<u>4,4</u>	<u>6,5</u>	<u>29,9</u>	<u>447</u>	<u>305</u>	<u>359</u>	<u>32,2</u>
2,2 – 620	0,1 – 12	0,8 – 13	0,5 – 88	310 – 530	3,4 – 710	7,2 – 920	0,2 – 73
вблизи г. Эрдэнэга							
2,5	0,21	2,8	1,3	710	1,1	17	0,23
1,8	0,19	2,6	0,7	440	1,4	14	0,23
1,6	0,25	2,2	0,7	660	1,5	19	0,24
1,7	0,2	2,9	0,9	590	1,6	21	0,3
г. Эрдэнэт (n=7)							
<u>3,6</u>	<u>0,2</u>	<u>3</u>	<u>0,8</u>	<u>433</u>	<u>1,6</u>	<u>14,3</u>	<u>0,2</u>
1,2 – 7,2	0,18 – 0,2	2,7 – 3,4	0,7 – 0,9	220 – 550	0,8 – 2,8	13 – 16	0,1 – 0,4
<u>6,1</u>	<u>0,2</u>	<u>2,9</u>	<u>1,2</u>	<u>585</u>	<u>1,5</u>	<u>18,2</u>	<u>0,3</u>
0,8 – 20	0,2 – 0,2	2,3 – 3,3	0,6 – 2	560 – 600	0,5 – 2,5	11 – 24	0,1 – 0,5
<u>12,3</u>	<u>0,2</u>	<u>3</u>	<u>1,9</u>	<u>620</u>	<u>1,9</u>	<u>19</u>	<u>0,3</u>
1,4 – 41	0,2 – 0,3	2,7 – 3,4	0,8 – 4	540 – 690	1,1 – 2,9	14 – 29	0,1 – 0,5
<u>4,3</u>	<u>0,3</u>	<u>3,1</u>	<u>1</u>	<u>597</u>	<u>3,1</u>	<u>21,3</u>	<u>0,4</u>
1,7 – 8,5	0,2 – 0,3	2,7 – 3,4	0,9 – 1,2	550 – 630	1,7 – 4,9	20 – 22	0,3 – 0,4
литосферы							
1,1	0,09	2,5	0,81	628	2,03	17	0,23

Cd, Cu, Zn и Sn на значительные расстояния способствует сохранившаяся на поверхности зерен пленка флотореагентов [Ходанович, Смирнова, Яценко, 2002].

Дифференциация остальных элементов, не относящихся к группе рудных и спутников, в городских катенах незначительно отличается от фоновых для V, Co и Ba, а для Ni, Cr и Sr максимум концентраций сместился в среднюю часть – ТЭ и ТА ландшафты.

Антропогенное воздействие на почвы г. Эрдэнэга обусловлено постоянной атмосферной поставкой пыли, образующейся при дроблении добываемой породы и развевании техногенных песков хвостохранилища. В отличие от Закаменска значительного преобразования физико-химических свойств в зоне влияния ЭММК не выявлено: наименьшие значения

pH=6,2–6,5 приурочены к автономным позициям, наибольшие – к супераквальным (7,5–8); минимальное содержание ПОВ от 4 до 4,5% отмечено на склонах, а наибольшее – до 6,5–7% – в супераквальных позициях. Почвы в автономных ландшафтах испытывают слабое воздействие: здесь происходит незначительное накопление только рудного элемента Cu ($K_c=1,6$) и типичного для Селенгинского комплекса As (1,6). По сравнению с фоновыми почвами наибольшее рассеяние характерно для Cr ($K_p=2,2$) и Ni (2). В светло-каштановых почвах склонов и темно-каштановых почвах трансаккумулятивных позиций накапливаются рудные элементы: Mo ($K_c=3,4$ и 7,7 соответственно), Cu (5,2 и 5,3), Sb (1,7 и 1,7). Поступление этих ТММ обусловлено природными и

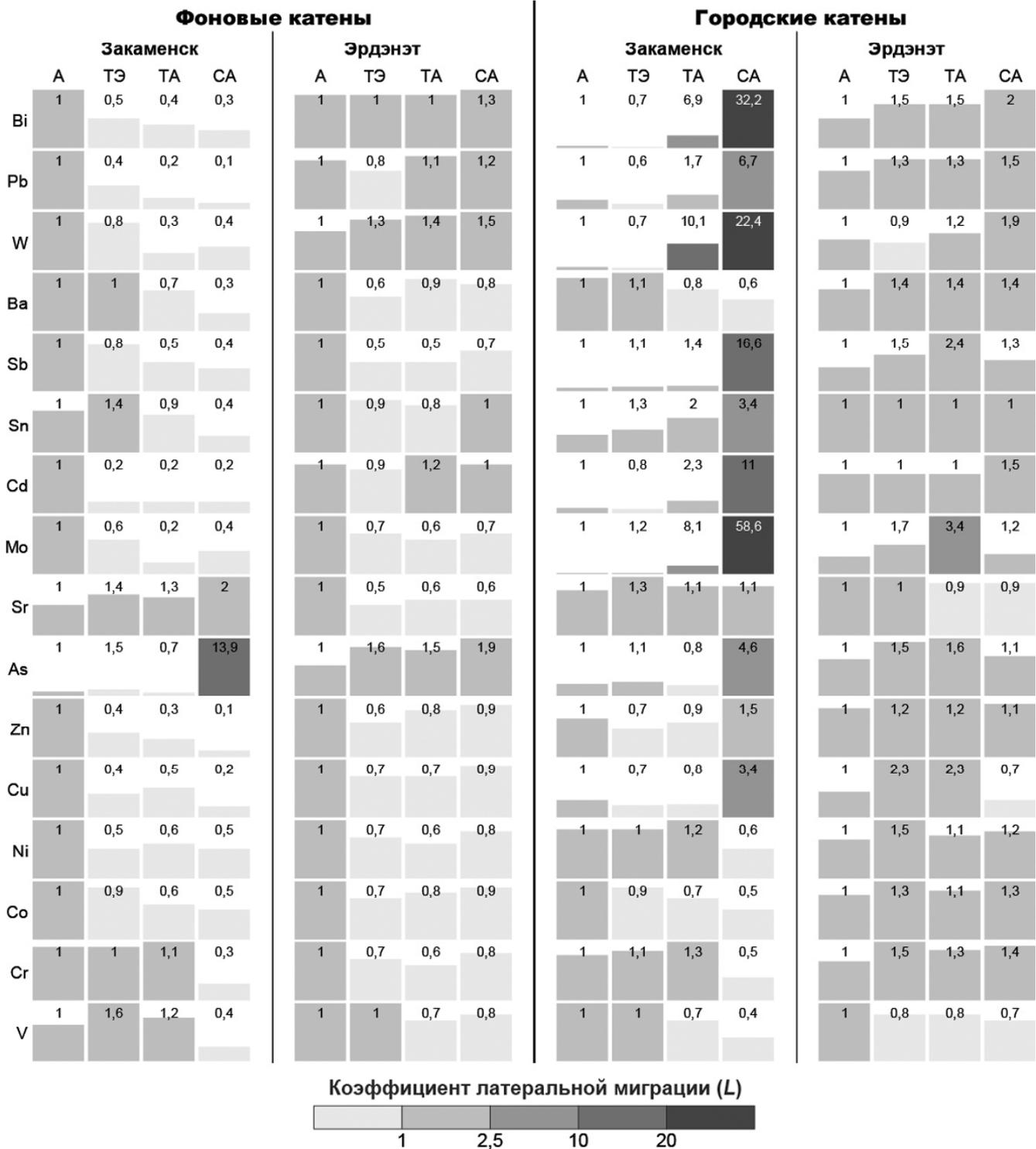


Рис. 3. Распределение ТММ в поверхностных горизонтах фоновых и городских почвенных катен гг. Закаменска и Эрдэнэта

Fig. 3. Distribution of HMMs in surface horizons of background and urban soil catenas in the towns of Zakamensk and Erdenet

антропогенными факторами. Первые связаны с литогеохимическими особенностями Эрдэнэтского месторождения: в почвообразующих породах повышены концентрации халькофильных Sb, Pb, As [Гаврилова, Максимюк, Оролмаа, 2010]. Вторые – с поступлением водных растворов, просачивающихся сквозь толщу техногенных песков хвостохранилищ, а также с продуктами эксплуатации автотранспорта.

В г. Эрдэнэте, в отличие от г. Закаменска, где контрастность распределения ТММ по сравнению с фоновой катеной возросла на порядок, латеральная дифференциация ТММ характеризуется очень низкими значениями коэффициентов L – от 0,8 до 3,4. Халькофильные элементы Cu, Zn, Mo, Sb, свойственные породам Эрдэнэтского комплекса, и Cu-Mo штокверковых месторождений, сменили тип диффе-

ренциации с верхне-аккумулятивного в фоновых условиях на срединно-аккумулятивный в пределах города. Наибольшая контрастность латерального распределения характерна для рудных элементов Mo ($L=3,4$), Cu (2,3) и их спутника Sb (2,4), что, скорее всего, вызвано золотым переносом обогащенных ТММ тонких частиц с поверхности хвостохранилища, промышленной площадки ЭММК, отвалов вскрышных пород и отстойников ТЭЦ. У Cr и Co верхне-аккумулятивный тип распределения сменился на вне-аккумулятивный. Остальные элементы в зоне влияния ЭММК не подверглись значительному перераспределению, что свидетельствует о слабой латеральной миграции ТММ.

Таким образом, в горнопромышленных ландшафтах в результате техногенного воздействия возросла контрастность латерального распределения ТММ с усилением аккумуляции в подчиненных ландшафтах. В Закаменске в условиях гумидного климата осадков на 25–35% больше чем в Эрдэнэте, крутизна склонов значительно больше, все это способствует миграции элементов в катенах и накоплению в супераквальных позициях халькофильных элементов Mo, Bi, W, Sb, Cu, As, Cd, Pb, Sn. Вторичным источником ТММ являются расположенные в трансаккумулятивных ландшафтах хвостохранилища, размыв которых приводит к формированию аномалий в аллювиально-луговых и лугово-болотных почвах пойм. В Эрдэнэте перераспределение ТММ из-за водной эрозии выражено значительно меньше, аномалии формируются в трансаккумулятивных позициях, где накапливаются Cu, Mo, Sb, As, что обусловлено в основном петрохимическими особенностями пород Селенгинского комплекса.

Диагностика латеральных геохимических барьеров. Определение ЛГХБ в городских почвенных катенах основывается на результатах многофакторного регрессионного анализа, связывающих дифференциацию ТММ с природными и антропоген-

ными факторами. Рассмотрено влияние следующих факторов: (1) функционального назначения городских территорий, которое отражает антропогенную нагрузку на ландшафты; (2) почвообразующих пород, определяющих природную геохимическую неоднородность почв; (3) геохимической позиции элементарного ландшафта, характеризующей его положение в рельефе; (4–9) физико-химических свойств почв, влияющих на миграционную способность элементов: реакции среды (4), гранулометрического состава – количества физической песка (5) и илистой фракции (6), содержания ПОВ (7), Fe (8) и Mn (9). Различные классы ЛГХБ диагностировались по сочетанию факторов, соответствующих условиям максимального накопления тех или иных ТММ.

В почвах Закаменска концентрации всех элементов контролируются физико-химическими свойствами почв (табл. 2), исключение – Cd и Sb, пространственное распределение которых связано с неоднородностью почвообразующих пород. Наиболее значимым фактором оказалось содержание Mn: при его уменьшении в промышленной зоне повышается содержание Cr, Cu, Zn, As, Bi в подчиненных СА и ТА позициях. Это отмечается в токсифабрикатах Джидинского хвостохранилища и токсиндустратах на рекультивированном участке. Материал отходов, состоящий из переработанных Джидинских руд, содержит 995–1113 мг/кг Mn, что значительно меньше, чем в автономных позициях – 956–8900 мг/кг. ТММ осаждаются на сульфидном барьере в кислых условиях ($pH=3,4-3,8$).

Характер латерального перераспределения и накопления рудных элементов Mo и W зависит только от одного фактора: содержания физического песка, при увеличении которого до 95% концентрации Mo увеличиваются в 18, а W – в 3 раза. Это объясняется антропогенным происхождением этой фракции: при извлечении полезной компоненты исходная порода, обогащенная Mo и W, дробится на частицы размером менее 0,07 мм, образуя пыль, которая рас-

Таблица 2

Влияние природных и антропогенных факторов на распределение ТММ в поверхностных горизонтах почв катен в зоне влияния ДВМК

Фактор	V	Sr	Cr	Cu	Zn	As	Bi	Ba	Mo	W	Co	Pb	Ni	Sn	Cd	Sb
Почвообразующая порода														3	1	1
Функциональная зона																
Геохимическая позиция	3	2	3													
Валовое содержание Mn			1–, 2+	1–	1–	1–	1–	1+, 2+			2+	2–			2–	
Валовое содержание Fe	2+	3–								2+	2+	1+	3+			
Содержание ПОВ												2–	4+	1–		
pH													1+			
Физический песок								3–	1+	1+	1–		2–			
Ил	1+	1–			2–		2–							2+	2–	2–

Примечание. В табл. 2 и 3 ранги от 1 до 4 показывают уменьшение значимости фактора, а знак «+» или «–» – прямую или обратную связь соответственно, для качественных факторов характер связи не определялся.

создана в 1988 г. с использованием старых технологий, поэтому для нее правомерно использовать результаты исследований гранулометрического состава золы 68 ТЭЦ [Пантелеев с соавт., 1985]. Он на 7–21% представлен илстой фракцией, 32–84% – пылевидной и 2–59% – песчаной. Вынос тонких фракций золы ТЭЦ в подчиненные ландшафты обуславливает формирование в катенах I и II (рис. 2) природно-техногенного сорбционно-седиментационного ЛГХБ. Другая группа ТММ – V, Co, Zn, Sn – осаждается на хемосорбционном барьере, а W и Bi – на глеевом.

Таким образом, общей чертой горнопромышленных ландшафтов 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) в подчиненных ландшафтах. Остальные элементы в зоне влияния ДВМК осаждаются на барьерах, имеющих природное происхождение: на сульфидном – Cr, Cu, Zn, As, Bi; хемосорбционном – Pb, щелочном – Ni. Зона влияния ЭММК отличается накоплением V, Co, Zn, Sn на хемосорбционном барьере. Латерального перераспределения Cd, Sb в Закаменске и As, Sb, Ba, Pb в Эрдэнэте не выявлено, дифференциация этих элементов обусловлена литогеохимической неоднородностью почвообразующих пород.

Благодарности. Работы выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-29-05055 офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдонин В.Н.* Техногенное окисление сульфидов Красногвардейского месторождения на Урале // *Маг-лы по минералогии месторождений Урала*. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 63–69.
- Авессаломова И.А.* Функционирование и динамика горных ландшафтов // *География, общество, окружающая среда*. Т. II. Функционирование и современное состояние ландшафтов. М.: Городец, 2004. С. 154–170.
- Богданова М.Д., Гаврилова И.П., Герасимова М.И.* Элементарные ландшафты как объекты ландшафтно-геохимического картографирования // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2012. Т. 1. С. 23–28.
- Бортников Н.С., Богатилов О.А., Карамурзов Б.С. и др.* Оценка воздействия захороненных промышленных отходов Тырныаузского комбината на почвенно-растительный слой Приэльбрусья // *Вестн. Владикавказского научного центра*. 2015. Т. 15. № 2. С. 35–45.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.* Суточная температура воздуха и количество осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТР) (свидетельство № 2014620942). М.: ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных», 2014.
- Водяницкий Ю.Н.* Изучение тяжелых металлов в почвах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2005. 111 с.
- Водяницкий Ю.Н.* Железо в гидроморфных почвах. М.: АПР, 2017. 160 с.
- Востокова Е.А., Гунин П.Д.* Экосистемы бассейна Селенги. М.: Наука, 2005. 359 с.
- Гаврилова И.П., Касимов Н.С.* Практикум по геохимии ландшафта: Учеб. пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 73 с.
- Гаврилова С.П., Максимюк И.Е., Оролмаа Д.* Молибден-медно-порфировое месторождение Эрдэнэт (Монголия). М.: ИМГРЭ, 2010. 270 с.
- Геннадиев А.Н., Жидкин А.П.* Типизация склоновых сопряжений почв по количественным проявлениям смыва-намыва вещества // *Почвоведение*. 2012. № 1. С. 21–31.
- Глазовская М.А.* Геохимические барьеры в почвах: типология, функциональные особенности и экологическое значение // *Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской* / Под ред. Н.С. Касимова, М.И. Герасимовой. М.: АПР, 2012. С. 26–44.
- ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. М.: Стандартинформ, 2008.
- Григорьев Н.А.* Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 382 с.
- Елпатьевский П.В.* Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 253 с.
- Елпатьевский П.В.* Гидрохимические потоки, продуцируемые сульфидизированными техногенными литоаккумуляциями // *География и природные ресурсы*. 2003. № 2. С. 26–33.
- Зиновьева И.Г., Соколов А.В., Федоров И.Б. и др.* Вторая очередь мероприятий по ликвидации экологических последствий деятельности Дзидинского вольфрамо-молибденового комби-

ната в Закаменском районе Республики Бурятия: Предпроектные исследования. Научно-технический отчет. Чита: ООО «Гидроспецстрой», 2011. 213 с.

Карпель А., Бочков К.П., Дербатов В.И. и др. Отчет о почвенно-мелиоративных условиях территории II очереди строительства г. Эрдэнэт в Монгольской Народной Республике. Москва: ПНИИИС, Техархив, 1975. Т. I. 20 с.

Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АИП, 2016. 320 с.

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

Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 191 с.

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

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.

Кривцов А.И., Звездов В.С., Мигачев И.Ф. и др. Медно-порфиновые месторождения. М.: ЦИНГРИ, 2001. 232 с.

Крупская Л.Т., Мелконян Р.Г., Майорова Л.П. и др. Обновление экологической реабилитации территорий, подвергшихся воздействию объектов накопленного экологического ущерба (хвостохранилищ) в результате прошлой хозяйственной деятельности бывших горных предприятий в Дальневосточном федеральном округе // Горный информационно-аналитический бюл. 2017. № 4. С. 5–15.

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

МРФ. Мировая реферативная база почвенных ресурсов 2014. Международная система почвенной классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Исправленная и дополненная версия 2015 / Под ред. М.И. Герасимовой, П.В. Красильникова. М.: ФАО и МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017. 216 с.

Новоселов С.С. Исследование выбросов в атмосферу твердых продуктов сгорания мазута и разработка методов их сокращения. Дис. ... канд. тех. н. М., 1983. 171 с.

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

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

Пантелеев В.Г., Ларина Э.А., Мелентьев В.А. и др. Состав и свойства золы и шлака ТЭС: справочное пособие / Под ред. В.А. Мелентьева. Л.: Энергоиздат, Ленинградское отд., 1985. 288 с.

Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафтов. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.

Почва, город, экология / Под ред. Г.В. Добровольского. М.: Фонд «За экономическую грамотность», 1997. 320 с.

Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

Семячков А.И., Почечун В.А. Системный подход в геоэкологических исследованиях горнопромышленных комплексов. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2016. 292 с.

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.

Смирнова О.К., Сарапулова А.Е., Цыренова А.А. Особенности нахождения тяжелых металлов в геотехногенных ландшафтах Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. Т. 4. С. 319–327.

Терехина Н.В. Методические указания к проведению фитогеохимических исследований. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет, 2010. 26 с.

Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е., Бажга С.Н. и др. Геохимическая трансформация почвенного покрова в районе добычи

медно-молибденовых руд (г. Эрдэнэт, Монголия) // Инженерные изыскания. 2014. Т. 12. С. 26–35.

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.

Убугунов Л.Л., Убугунова В.И., Бадмаев Н.Б. и др. Почвы Бурятии: разнообразие, систематика и классификация // Вестн. Бурятской гос. с.-х. академии им. В.Р. Филиппова. 2012. Т. 2. С. 45–52.

Удачин В.Н., Еришов В.В. Экспериментальное исследование миграции меди, цинка и свинца из промтоходов Карабашской геотехнической системы. Миасс: Наука, 1995. 56 с.

Хайбрахманов Т.С., Тимофеев И.В., Кошелева Н.Е. Опыт построения карты родов элементарных ландшафтов на основе ЦМР для территории г. Закаменска (Бурятия) // Геоинформационное картографирование в регионах России. Мат-лы VII Всерос. научно-практ. конф. (Воронеж, 10–12 декабря 2015 г.). 2015. С. 148–152.

Ханчук А.И., Крупская Л.Т., Зверева В.П. Экологические проблемы освоения оловорудного сырья в Приморье и Приамурье // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 62–67.

Ходанович П.Ю. Лежалые отходы обогащения Джидинского вольфрамо-молибденового комбината как комплексные техногенные месторождения // Состояние и перспективы развития минерально-сырьевого и горнодобывающего комплекса Республики Бурятия. 1999. С. 142–151.

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.

Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). Русское издание. СПб: Мир и семья, 1995. 992 с.

Юнатов А.А. Основные черты растительного покрова Монгольской народной республики // Тр. Монгольской комиссии АН СССР. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 223.

Юргенсон Г.А., Смирнова О.К., Меркулов Е.Б. Современное минералообразование в природно-техногенной системе Барун-Нарынского хранилища отходов обогащательного производства Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование. Тр. 2-го Всерос. симп. и VIII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана. Чита: ИПРЭК СО РАН, 2008. С. 138–143.

Anawar H.M., Freitas M.C., Canha N. 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. V. 33. № 4. P. 353–362.

Benin A.L., Sargent J.D., Dalton M. et al. High Concentrations of Heavy Metals in Neighborhoods near Ore Smelters in Northern Mexico // Environ. Health Perspect. 1999. V. 107. № 4. P. 279–284.

Cornell R.M., Schwertmann U. The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 665 p.

EMC. Официальный сайт КОО «Предприятие Эрдэнэт» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.erdenetmc.mn/> (дата обращения: 12.07.2016).

Erdenet Carpet. Официальный сайт Erdenet Carpet LLC [Электронный ресурс]. URL: <http://www.carpet.mn/> (дата обращения: 12.07.2016).

Ericson B., Hanrahan D., Kong V. The World's Worst Pollution Problems: The Top Ten of the Toxic Twenty. New York: Blacksmith Institute, 2014. 72 p.

Fortescue J.A.C. Environmental Geochemistry // A Holistic Approach. New York, NY: Springer, 1980. 342 p.

Gomez-Alvarez A., Valenzuela-Garcia J.L., Aguayo-Salinas S. et al. Chemical partitioning of sediment contamination by heavy metals in the San Pedro River, Sonora, Mexico // Chem. Speciat. Bioavailab. 2007. V. 19. № 1. P. 25–35.

- Gough L.P., Eppinger R.G., Briggs P.H. et al.* Biogeochemical Characterization of an Undisturbed Highly Acidic, Metal-Rich Bryophyte Habitat, East-Central Alaska, U.S.A. // *Arctic, Antarct. Alp. Res.* 2006. V. 38. № 4. P. 522–529.
- Hartley W., Edwards R., Lepp N.W.* Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests // *Environ. Pollut.* 2004. V. 131. № 3. P. 495–504.
- Heavy Metals in Soils / Ed. B.J. Alloway. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. 614 p.
- Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geol.* 2008. V. 253. № 3–4. P. 205–221.
- Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. Boca Raton: CRC Press, 2011. 548 p.
- KNMI. The Royal Netherlands Meteorological Institute Climate Explorer [Электронный ресурс]. URL: <https://climexp.knmi.nl> (дата обращения: 01.07.2016).
- Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Timofeev I.V.* Potentially toxic elements in urban soil catenas of W-Mo (Zakamensk, Russia) and Cu-Mo (Erdenet, Mongolia) mining areas // *J. Soils and Sediments.* 2018. V. 18. № 6. P. 2318–2334.
- Li Z., Ma Z., van der Kuijp T.J. et al.* A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 468–469. P. 843–853.
- Mileusnić M., Mapani B.S., Kamona A.F. et al.* Assessment of agricultural soil contamination by potentially toxic metals dispersed from improperly disposed tailings, Kombat mine, Namibia // *J. Geochemical Explor.* 2014. V. 144. P. 409–420.
- Moncur M.C., Ptacek C.J., Blowes D.W. et al.* Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment // *Appl. Geochemistry.* 2005. V. 20. № 3. P. 639–659.
- Pacyna E.G., Pacyna J.M., Fudala J. et al.* Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. № 38. P. 8557–8566.
- Rawls W.J., Pachepsky Y.A.* Using Field Topographic Descriptors To Estimate Soil Water Retention // *Soil Sci.* 2002. V. 167. № 7. P. 423–435.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry.* 2003. V. 3. P. 1–64.
- Sommer M., Schlichting E.* Archetypes of catenas in respect to matter – A concept for structuring and grouping catenas // *Geoderma.* 1997. V. 76. № 1–2. P. 1–33.
- Timofeev I.V., Kosheleva N.E.* Geochemical disturbance of soil cover in the nonferrous mining centers of the Selenga River basin // *Environ. Geochem. Health.* 2017. V. 39. № 4. P. 803–819.
- Violante A., Del Gaudio S., Pigna M. 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. P. 39–69.
- Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.

Поступила в редакцию 01.10.2018

После доработки 15.11.2018

Принята к публикации 06.12.2018

N.E. Kosheleva¹, I.V. Timofeev², N.S. Kasimov³

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS AND METALLOIDS
IN SOIL CATENES OF MINING LANDSCAPES
(CASE STUDIES OF ZAKAMENSK, RUSSIA, AND ERDENET, MONGOLIA)

Soil-geochemical surveys of 2011–2013 resulted in the determination of bulk contents of 16 heavy metals and metalloids (HMMs) of 1 to 3 hazard categories in urban and background catenas of the towns of Zakamensk and Erdenet. Geochemical structure of mining centers background catenas is governed by the high litho-geochemical heterogeneity of parent rocks. The highest concentrations of Ba, Sb, Cd, Mo, Zn, Cu, Ni, Co within the Dzhida and Erdenet ore clusters correlate with the underdeveloped mountain soils of autonomous landscapes. Ore fields exploitation sharply increases the lateral contrast of HMMs and results in the accumulation of chalcophile elements Mo, Bi, W, Sb, Cu, As, Cd, Pb and Sn in Zakamensk supraequal positions while Cu, Mo, Sb and As accumulate in Erdenet trans-accumulative positions. Recent erosion processes destroy tailing dumps, thus supporting the formation of artificial natural-anthropogenic sorption-sedimentological lateral geochemical barriers. The increased content of sand in Zakamensk and the input of silt in Erdenet result in the accumulation of ore elements (Mo, W and Cu) at the barriers in subordinate landscapes.

Key words: priority pollutants, tailing dump, physical-chemical properties, geochemical barriers mining centers

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 17-29-05055 офи_м).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Professor, D.Sc. in Geography; *e-mail:* natalk@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, Research Scientist, PhD in Geography; *e-mail:* vano-timofeev@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography, President of the Faculty, Academician of the RAS, D.Sc. in Geography; *e-mail:* info@geogr.msu.ru

REFERENCES

- Anawar H.M., Freitas M.C., Canha N. 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. V. 33. № 4. P. 353–362.
- Avdonin V.N.* Tekhnogennoe okislenie sul'fidov Krasnogvardejskogo mestorozhdeniya na Urale [Technogenic oxidation of sulphides of the Krasnogvardeyskoye field in the Urals] // *Materialy po mineralologii mestorozhdenij Urala*. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR, 1984. P. 63–69. (In Russian).
- Avessalomova I.A.* Funktsionirovanie i dinamika gornyx landshaftov [Functioning and dynamics of mountain landscapes] // *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushhaya sreda*. Tom II. Funktsionirovanie i sovremennoe sostoyanie landshaftov. Moskva: Gorodets, 2004. P. 154–170. (In Russian).
- Benin A.L., Sargent J.D., Dalton M. et al.* High Concentrations of Heavy Metals in Neighborhoods near Ore Smelters in Northern Mexico // *Environ. Health Perspect*. 1999. V. 107. № 4. P. 279–284.
- Bogdanova M.D., Gavrilova I.P., Gerasimova M.I.* Elementarnye landshafty kak ob'ekty landshaftno-geokhimicheskogo kartografirovaniya [Elementary landscapes as objects of landscape-geochemical mapping] // *Vestnik Mosk. un-ta. Seriya 5. Geografiya*. 2012. T. 1. S. 23–28. (In Russian).
- Bortnikov N.S., Bogatkov O.A., Karamurzov B.S. et al.* Otsenka vozdeystviya zakhronennykh promyshlennykh otkhodov Tyrnyauzskogo kombinata na pochvenno-rastitel'nyj sloj Prieh'brus'ya [Assessment of the impact of buried industrial waste of the Tyrnyauz Combine on soil and vegetation layer in the Mt. Elbrus region] // *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. 2015. V. 15. № 2. P. 35–45. (In Russian).
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M.* Sutochnaya temperatura vozdukh i kolichestvo osadkov na meteorologicheskikh stantsiyakh Rossii i byvshego SSSR (TTTR) [Daily air temperature and amount of precipitation at the meteorological stations of Russia and the former USSR (TTTR)] (svidetel'stvo № 2014620942). Moskva: FGBU «Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij inctitut gidrometeorologicheskoy informatsii – Mirovoj tsentra dannykh», 2014. (In Russian).
- Cherepanov S.K.* Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR) [Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR)]. Russkoe izdanie. SPb: Mir i sem'ya, 1995. 992 p. (In Russian).
- Cornell R.M., Schwertmann U.* The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. 665 p.
- Elpat'evskij P.V.* Geokhimiya migratsionnykh potokov v prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh geosistemakh [Geochemistry of migration flows in natural and natural-technogenic geosystems]. Moskva: Nauka, 1993. 253 p. (In Russian).
- Elpat'evskij P.V.* Hidrokhimicheskie potoki, produksiruemye sul'fidizirovannymi tekhnogennymi litoakkumulyatsiyami [Hydrochemical flows produced by sulphidized technogenic lithoaccumulations] // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2003. № 2. P. 26–33. (In Russian).
- EMC. Official site The Erdenet Enterprise Ltd [Electronic source]. URL: <https://www.erdenetmc.mn/> (Accessed: 12.07.2016).
- Erdenet Carpet. Official site Erdenet Carpet LLC [Electronic source]. URL: <http://www.carpet.mn/> (Accessed: 12.07.2016).
- Ericson B., Hanrahan D., Kong V.* The World's Worst Pollution Problems: The Top Ten of the Toxic Twenty. New York: Blacksmith Institute, 2014. 72 p.
- Fortescue J.A.C.* Environmental Geochemistry / A Holistic Approach. New York, NY: Springer, 1980. 342 p.
- Gavrilova I.P., Kasimov N.S.* Praktikum po geokhimii landshafta [Tutorial on landscape geochemistry]: Ucheb.posoboie. Moskva: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1989. 73 p. (In Russian).
- Gavrilova S.P., Maksimiyuk I.E., Orolmaa D.* Molibden-medno-porfirivoe mestorozhdenie Ehrdehneht (Mongoliya) [The Erdenet molybdenum-copper-porphry deposit (Mongolia)]. Moskva: IMGREH, 2010. 270 p. (In Russian).
- Gennadiev A.N., Zhidkin A.P.* Typification of soil catenas on slopes from the quantitative manifestations of the accumulation and loss of soil material // *Eurasian Soil Science*. 2012. V. 45. № 1. P. 21–31.
- Glazovskaya M.A.* Geokhimicheskie bar'ery v pochvakh: tipologiya, funktsional'nye osobennosti i ehkologicheskoe znachenie [Geochemical barriers in soils: typology, functional features and ecological significance] // *Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv*. 100 let so dnya rozhdeniya M.A. Glazovskoj / Red. N.S. Kasimov, M.I. Gerasimov. Moskva: APR, 2012. P. 26–44. (In Russian).
- Gomez-Alvarez A., Valenzuela-Garcia J.L., Aguayo-Salinas S. et al.* Chemical partitioning of sediment contamination by heavy metals in the San Pedro River, Sonora, Mexico // *Chem. Speciat. Bioavailab*. 2007. V. 19. № 1. P. 25–35.
- GOST 17.4.1.02-83. Okhrana prirody. Pochvy. Klassifikatsiya khimicheskikh veshhestv dlya kontrolya zagryazneniya [Nature Protection. Soil. Classification of chemicals for pollution control]. Moskva: Standartinform, 2008. (In Russian).
- Gough L.P., Eppinger R.G., Briggs P.H. et al.* Biogeochemical Characterization of an Undisturbed Highly Acidic, Metal-Rich Bryophyte Habitat, East-Central Alaska, U.S.A. // *Arctic, Antarct. Alp. Res*. 2006. V. 38. № 4. P. 522–529.
- Grigor'ev N.A.* Raspredelenie khimicheskikh ehlementov v verkhnej chasti kontinental'noj kory [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2009. 382 p. (In Russian).
- Hartley W., Edwards R., Lepp N.W.* Arsenic and heavy metal mobility in iron oxide-amended contaminated soils as evaluated by short- and long-term leaching tests // *Environ. Pollut*. 2004. V. 131. № 3. P. 495–504.
- Heavy Metals in Soils / Ed. B.J. Alloway. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. 614 p.
- Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // *Chem. Geol*. 2008. V. 253. № 3–4. P. 205–221.
- Kabata-Pendias A.* Trace Elements in Soils and Plants. Fourth Edition. Boca Raton: CRC Press, 2011. 548 p.
- Kachinskij N.A.* Mekhanicheskij i mikroagregatnyj sostav pochvy, metody ego izucheniya [Mechanical and micro-aggregate composition of soil, methods of its study]. Moskva: Izd-vo AN SSSR, 1958. 191 p. (In Russian).
- Karpel' A., Bochkov K.P., Derbakov V.I. et al.* Otchet o pochvenno-meliorativnykh usloviyakh territorii II ocheredi stroitel'stva g. Ehrdehneht v Mongol'skoj Narodnoj Respublike. Tom I. [Report on the soil-reclamation conditions of the area for the second construction stage in the city of Erdenet, Mongolian People's Republic (V. 1)] Moskva: PNIIS, Tekharkhiv, 1975. 20 p. (In Russian).
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. et al.* Geokhimiya landshaftov Vostochnoj Moskvy [Geochemistry of the Eastern Moscow landscapes]. Moskva: APR, 2016. 320 p. (In Russian).
- Kasimov N.S., Samonova O.A.* Katenarnaya landshaftno-geokhimicheskaya differentsiatsiya [Catenary landscape-geochemical differentiation] // *Geografiya, obshchestvo, okruzhayushhaya sreda*. Tom II. Funktsionirovanie i sovremennoe sostoyanie landshaftov. Moskva: Gorodets, 2004. P. 479–489. (In Russian).
- Khajbrakhmanov T.S., Timofeev I.V., Kosheleva N.E.* Opyt postroeniya karty rodov ehlementarnykh landshaftov na osnove TSMR dlya territorii g. Zakamenska (Buryatiya) [An experience in mapping elementary landscapes of the town of Zakamensk (Buryat Republic) basing of the DEM] // *Geoinformatsionnoe kartografirovaniye v regionakh Rossii materialy VII Vserossijskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Voronezh, 10–12 dekabrya 2015 g.)*. 2015. P. 148–152. (In Russian).
- Khanchuk A.I., Krupskaya L.T., Zvereva V.P.* Ecological problems of development of tin ore resources in Primorie and

Priamurie // *Geography and Natural Resources*. 2012. V. 33. Iss. 1. P. 45–49.

Khodanovich P.Yu. Lezhalye otkhody obogashheniya Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata kak kompleksnye tekhnogennye mestorozhdeniya [Mature washery refuses of the Dzida tungsten-molybdenum plant as complex technogenic deposits] // *Sostoyanie i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evogo i gornodobyvayushhego kompleksa Respubliki Buryatii*. 1999. P. 142–151. (In Russian)

Khodanovich P.Yu., Smirnova O.K., Yatsenko R.I. Ehkologicheskie problemy osvoeniya sul'fidsoderzhashhikh vol'framovykh mestorozhdenij v usloviyakh taezhno-merzlotnykh landshaftov raschlenennogo srednegor'ya [Environmental problems of the development of tungsten sulfide deposits in the permafrost taiga landscapes of dissected uplands] // *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*. 2002. № 12. P. 52–59. (In Russian)

Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk: Ojkumena, 2004. 343 p. (In Russian)

KNMI. The Royal Netherlands Meteorological Institute Climate Explorer [Electronic source]. URL: <https://climexp.knmi.nl> (Accessed: 01.07.2016).

Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Timofeev I.V. Potentially toxic elements in urban soil catenas of W-Mo (Zakamensk, Russia) and Cu-Mo (Erdenet, Mongolia) mining areas // *J. Soils and Sediments*. 2018. V. 18. № 6. P. 2318–2334.

Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Vlasov D.V. Factors of the accumulation of heavy metals and metalloids at geochemical barriers in urban soils // *Eurasian Soil Science*. 2015. V. 48. № 5. P. 476–492.

Krivtsov A.I., Zvezdov V.S., Migachev I.F. et al. Mednoporfirovye mestorozhdeniya [Copper porphyry deposits]. Moskva: TSINGRI, 2001. 232 p. (In Russian)

Krupskaya L.T., Melkonyan R.G., Mayorova L.P. et al. Obosnovaniye ekologicheskoy reabilitatsii territorij, podvergshikhся vozdeystviyu ob'ektov nakoplennoego ehkologicheskogo ushherba (khvostokhranilishh) v rezul'tate proshloj khozyajstvennoj deyatel'nosti byvshikh gornyx predpriyatij v Dal'nevostochnom federal'nom okruge [Justification of the ecological rehabilitation of territories exposed to the objects of accumulated environmental damage (tailing dumps) as a result of past economic activities of former mining enterprises in the Far Eastern Federal District] // *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten*. 2017. № 4. P. 5–15. (In Russian)

Li Z., Ma Z., van der Kuip T.J. et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment // *Sci. Total Environ*. 2014. V. 468–469. P. 843–853.

Mileusniac M., Mapani B.S., Kamona A.F. et al. Assessment of agricultural soil contamination by potentially toxic metals dispersed from improperly disposed tailings, Kombat mine, Namibia // *J. Geochemical Explor*. 2014. V. 144. P. 409–420.

Ministerstvo sel'skogo khozyajstva SSSR. Klassifikatsiya i diagnostika pochv SSSR [Classification and diagnostics of soils of the USSR]. Moskva: Kolos, 1977. 223 p. (In Russian)

Moncur M.C., Ptacek C.J., Blowes D.W. et al. Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment // *Appl. Geochemistry*. 2005. V. 20. № 3. P. 639–659.

MRF. Mirovaya referativnaya baza pochvennykh resursov 2014. Mezhdunarodnaya sistema pochvennoj klassifikatsii dlya diagnostiki pochv i sozdaniya legend pochvennykh kart. Ispravlennaya i dopolnennaya versiya 2015 [World reference database of soil resources 2014. International soil classification system for soil diagnostics and creation of soil map legends. Revised and updated version 2015] Red. M.I. Gerasimova, P.V. Krasil'nikov. Moskva: FAO i MGU imeni M.V. Lomonosova, 2017. 216 p. (In Russian)

Nogina N.A. Pochvy Zabajkal'ya [Soils of the Transbaikalia]. Moskva: Nauka, 1964. 312 p. (In Russian)

Novoselov S.S. Issledovanie vybrosov v atmosferu tverdykh produktov sgoraniya mazuta i razrabotka metodov ikh sokrashheniya [Study of the atmospheric emissions of solid

products of heating oil combustion and the development of methods for their reduction]. Diss. ... kand. tekhn. nauk. Moskva, 1983. 171 p. (In Russian)

Opekunov A.Yu., Opekunova M.G. Geokhimiya tekhnogeneza v rajone razrabotki Sibajskogo medno-kolchedannogo mestorozhdeniya [Geochemistry of technogenesis in the area of the Sibay copper-pyrite deposit development] // *Zapiski gornogo instituta*. 2013. V. 203. P. 196–204. (In Russian)

Pacyna E.G., Pacyna J.M., Fudala J. et al. Current and future emissions of selected heavy metals to the atmosphere from anthropogenic sources in Europe // *Atmos. Environ*. 2007. V. 41. № 38. P. 8557–8566.

Panteleev V.G., Larina E.A., Melentyev V.A. et al. Sostav i svoystva zoly i shlaka TEHS: spravochnoe posobie [Composition and properties of ash and slag of TPP: reference book] / Red. V.A. Melent'ev. Leningrad: Energoizdat, Leningradskoe otделение, 1985. 288 p. (In Russian)

Perel'man A.I., Kasimov N.S. Geokhimiya landshaftov [Landscape geochemistry]. Moskva: Astreya-2000, 1999. 610 p. (In Russian)

Pochva, gorod, ehkologiya [Soil, city, ecology] / Red. G.V. Dobrovolskij. Moskva: Fond «Za ehkonomicheskuyu gramotnost'», 1997. 320 p. (In Russian)

Rawls W.J., Pachepsky Y.A. Using Field Topographic Descriptors To Estimate Soil Water Retention // *Soil Sci*. 2002. V. 167. № 7. P. 423–435.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*. 2003. V. 3. P. 1–64.

Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. et al. Geokhimiya okruzhayushhej sredy [Geochemistry of the environment]. Moskva: Nedra, 1990. 335 p. (In Russian)

Semyachkov A.I., Pochechun V.A. Sistemnyj podkhod v geoekologicheskikh issledovaniya gornopromyshlennykh kompleksov [System approach to geoecological investigation of mining complexes]. Ekaterinburg: Institut ehkonomiki UrO RAN, 2016. 292 p. (In Russian)

Smirnova O.K., Plyusnin A.M. Dzhidinskij rudnyj rajon (problemy sostoyaniya okruzhayushhej sredy) [The Dzida mining region (problems of the state of the environment)]. Ulan-Udeh: Izd-vo Buryatskogo nauchnogo tsentra SO RAN, 2013. 181 p. (In Russian)

Smirnova O.K., Sarapulova A.E., Tsyrenova A.A. Osobennosti nakhozheniya tyazhelykh metallov v geotekhnogennykh landshaftakh Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata [Specific features of heavy metal occurrence in the geotechnogenic landscapes of Dzida W-Mo plant] // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya*. 2010. V. 4. P. 319–327. (In Russian)

Sommer M., Schlichting E. Archetypes of catenas in respect to matter – A concept for structuring and grouping catenas // *Geoderma*. 1997. V. 76. № 1–2. P. 1–33.

Terekhina N.V. Metodicheskie ukazaniya k provedeniyu fitogeokhimicheskikh issledovanij [Methodical instructions for phytogeochemical research]. SPb: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet, 2010. 26 p. (In Russian)

Timofeev I.V., Kosheleva N.E., Bazha S.N. et al. Geokhimicheskaya transformatsiya pochvennogo pokrova v rajone dobychi medno-molibdenovykh rud (g. Ehrdeheht, Mongoliya) [Geochemical transformation of soil cover in the area of copper and molybdenum ores mining (Erdenet, Mongolia)] // *Inzhenernye izyskaniya*. 2014. V. 12. P. 26–35. (In Russian)

Timofeev I.V., Kasimov N.S., Kosheleva N.E. Soil cover geochemistry of mining landscapes in the South-East of Transbaikalia (city of Zakamensk) // *Geography and Natural Resources*. 2016. V. 37. № 3. P. 200–211.

Timofeev I.V., Kosheleva N.E. Geochemical disturbance of soil cover in the nonferrous mining centers of the Selenga River basin // *Environ. Geochem. Health*. 2017. V. 39. № 4. P. 803–819.

Ubugunov L.L., Ubugunova V.I., Badmaev N.B. et al. Pochvy Buryatii: raznoobrazie, sistematika i klassifikatsiya [Soils of Buryatia: diversity, taxonomy and classification] // *Vestnik*

Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skokhozyajstvennoj akademii im. V.R. Filippova. 2012. V. 2. P. 45–52. (In Russian)

Udachin V.N., Ershov V.V. Eksperimental'noe issledovanie migratsii medi, tsinka i svintsa iz promotkhodov Karabashskoj geotekhnicheskoy sistemy [Experimental study of copper, zinc and lead migration from industrial residues of the Karabash Geotechnical System]. Miass: Nauka, 56 p. (In Russian)

Violante A., Del Gaudio S., Pigna M. 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. P. 39–69.

Vodyanitskij Yu.N. Izuchenie tyazhelykh metallov v pochvakh [Study of heavy metals in soils]. Moskva: Pochvennyj institut im. V.V. Dokuchaeva, 2005. 111 p. (In Russian)

Vodyanitskij Yu.N. Zhelezo v gidromorfnykh pochvakh [Iron in hydromorphic soils]. Moskva: APR, 2017. 160 p. (In Russian).

Vostokova E.A., Gunin P.D. Ekhosistemy bassejna Selengi [Ecosystems of the Selenga River basin]. Moskva: Nauka, 2005. 359 p. (In Russian)

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. № 7. P. 1217–1232.

Yunatov A.A. Osnovnye cherty rastitel'nogo pokrova Mongol'skoj narodnoj respubliki [Main features of the vegetative

cover of the Mongolian People's Republic] // Trudy Mongol'skoj komissii AN SSSR. Moskva-Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1950. P. 223. (In Russian)

Yurgenson G.A., Smirnova O.K., Merkulov E.B. Sovremennoe mineraloobrazovanie v prirodno-tekhnogennoj sisteme Barun-Narynskogo khranilishha otkhodov obogatitel'nogo proizvodstva Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata [Modern mineral formation in the natural-technogenic system of the Barun-Naryn tailing dump of the Dzhida tungsten-molybdenum plant] // Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territorij. Sovremennoe mineraloobrazovanie Tr. 2 Vseros. simp. i VIII Vseros. chtenij pamyati akad. A.E. Fersmana. Chita: IPREK SO RAN. 2008. P. 138-143. (In Russian)

Zinov'eva I.G., Sokolov A.V., Fedorov I.B. et al. Vtoraya ochered' meropriyatij po likvidatsii ehkologicheskikh posledstvij deyatel'nosti Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata v Zakamenskom rajone Respubliki Buryatiya: Predproektnye issledovaniya. Nauchno-tekhnicheskij otchet. [Second Stage of Mitigation Measures in the Impact Zone of the Dzhida Tungsten-Molybdenum Plant in the Zakamensk District of the Buryat Republic. Pre-project Research Report] Chita: OOO «Gidrospetsstroj», 2011. 213 p. (In Russian)

Received 01.10.2018

Revised 15.11.2018

Accepted 06.12.2018