

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 502.63

### ГЕОХИМИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ (г. ЗАКАМЕНСК, ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2016 г. Н. Е. Кошелева, Н. С. Касимов, И. В. Тимофеев

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет,  
кафедра геохимии ландшафтов и географии почв,  
Ленинские горы, Москва, ГСП-1, 119991 Россия.  
E-mail: natalka@mail.ru; secretary@geogr.msu.ru; vano-timofeev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 08.09.2015 г.

По результатам почвенно-геохимических исследований 2012 г. установлены уровни содержания 17 тяжелых металлов и металлоидов I–III классов опасности в поверхностных горизонтах почв г. Закаменска (Республика Бурятия). Приоритетными загрязнителями городских почв являются халькофильные элементы W, Bi, Cd, Pb и Mo, концентрации которых превышают местный фон в 1.5–91 раз. В пределах города выделены две устойчивые полиэлементные парагенетические ассоциации Cs–W–Bi–Cu–Zn–Cd–Sn и As–Sb–Pb–Mo, имеющие общую зону аккумуляции в центре города, включающую аварийное, Барун-Нарынское, Зун-Нарынское и Джидинское хвостохранилища, где содержание элементов выше фоновых значений в 6–356 раз. Ассоциация Cs–W–Bi–Cu–Zn–Cd–Sn образует вторую зону аккумуляции в пределах Модонкульского техногенного месторождения. Наибольший уровень техногенной геохимической трансформации с суммарными показателями накопления  $Z_c = 185–710$ ,  $ИПЗ = 238–1737$  зафиксирован в промышленной зоне, в местах распространения техногенных почвенных образований. Среднее  $Z_c$  в целом по городу составляет 53, что свидетельствует о высоком уровне загрязнения территории. Эколого-геохимическая оценка состояния поверхностных горизонтов почв показала, что половина площади города находится в критическом экологическом состоянии и требует рекультивации. Ведущим фактором накопления загрязнителей в почвах является уровень антропогенной нагрузки, обусловленный функциональной принадлежностью территории. Распределение Co, V, Cr, Ni, Ba, Sr определяется ландшафтно- и почвенно-геохимическими условиями.

**Ключевые слова:** техногенные аномалии, горнопромышленные центры, тяжелые металлы, техногенез, экогеохимия.

#### ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие горнопромышленных районов сопровождается масштабными преобразованиями природной среды, обусловленными извлечением и обогащением полезных ископаемых и образованием значительных объемов отходов. Для этих территорий характерно слабоконтролируемое рассеяние больших масс веществ с аномально высоким содержанием элементов, негативно воздействующих на ландшафт [8]. Поэтому экологические последствия деятельности горнодобывающих комплексов активно исследуются во многих странах мира.

Публикации по этой тематике посвящены оценке загрязнения компонентов окружающей среды

при добыче руд цветных металлов под влиянием отходов и стоков горно-обогажительных комбинатов [5, 31, 33, 34]; изучению транслокации микроэлементов в системе почва–растения–живые организмы [5, 10, 29] и их атмосферному переносу [35]; пространственному и профильному распределению различных форм тяжелых металлов и металлоидов (ТММ) в почвах как основной депонирующей среде [27, 28, 36], а также состоянию здоровья населения [19, 32].

В настоящей работе рассматриваются геохимические особенности почвенного покрова в горнопромышленном центре Закаменске Республики Бурятия, где Джидинским вольфрамо-молибденовым комбинатом (ДВМК) более 60 лет велась раз-

работка месторождения цветных металлов. При закрытии предприятия не были реализованы проектные решения по охране окружающей среды с ликвидацией горных выработок, рекультивацией нарушенных земель и сбросом загрязненных шахтных вод в естественные водоемы. Все это привело к формированию зоны экологического бедствия [13]. Предшествующими исследованиями были установлены геологическая структура территории [2], химический состав отходов [25] и процессы современного минералообразования в хвостохранилищах [26]. В 2004–2005 гг. при комплексной эколого-геохимической характеристике города [17] составлены карты суммарного показателя загрязнения и моноэлементные геохимические карты снежного и почвенного покровов, карты загрязнения травянистой растительности.

Вместе с тем остается ряд вопросов, требующих дальнейшего изучения. Необходима адаптация существующих методик эколого-геохимической оценки техногенно-нарушенных территорий к условиям повышенного геохимического фона и высокой литолого-геохимической неоднородности. Степень геохимической трансформации почвенного покрова Закаменска должна определяться с использованием не регионального, а локальных фоновых значений для почв, сформированных на различных геологических структурах. Эколого-геохимическая оценка компонентов городских ландшафтов не дифференцирована по функциональным зонам города, отличающимся как уровнями, так и набором приоритетных элементов-загрязнителей. Отсутствует оценка северных участков города на высокой и средней пойме рек Модонкуль и Джиды, где сформировалось техногенное Модонкульское месторождение, и участка в пределах города, рекультивированного в 2011 г. ЗАО “Закаменск” в рамках ФЦП “Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие байкальской природной территории на 2012–2020 годы”. И, наконец, значительный теоретический и практический интерес представляет выявление ведущих ландшафтно-геохимических и антропогенных факторов, контролирующих аккумуляцию элементов в основной депонирующей среде – почвах.

Цель работы – определить геохимические изменения в почвенном покрове, вызванные добычей руд цветных металлов ДВМК. Для ее достижения решались следующие задачи:

– установить микроэлементный состав фоновых почв, сформировавшихся на различных почвообразующих породах, и элементы – основные

загрязнители почв в различных функциональных зонах города;

– выявить парагенетические ассоциации элементов и закономерности их пространственного распределения в поверхностных горизонтах городских почв;

– оценить степень техногенной геохимической трансформации почвенного покрова города.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Природные условия.** Территория г. Закаменска площадью 45 км<sup>2</sup> расположена на плоских северных отрогах Джидинского хребта в 460 км к юго-западу от г. Улан-Удэ. Глубина расчленения относительно водораздельных гребней над тальвегами долин не превышает 400 м<sup>1</sup>. Она относится к южной части Монголо-Сибирского горного пояса и приурочена к Селенгино-Витимской зоне – морфоструктуре 2-го порядка [22]. Почвообразующие породы в изучаемом районе представлены галечно-валунными, с песком и суглинком, образованиями мощностью до 60–80 м. Они включают: (1) четвертичные аллювиальные отложения; (2) палеозойский джидинский комплекс: его первую фазу – плагиограниты, гранодиориты и диориты; (3) среднепермскую-нижнетриасовую черныяровскую свиту – ортофиры, кераатофиры, туфы, туфолавы; (4) кембрийский комплекс – песчаники, алевролиты и известняки.

Климат в районе Закаменска резко континентальный, с холодной (до –49°C), продолжительной и относительно малоснежной зимой и теплым (среднемесячная температура июля – 15.6°C), коротким летом (см. *сноску* 1). Годовое количество осадков составляет 250–300 мм, ветер в теплый период преимущественно юго-западного, а зимой – северного и северо-западного направлений. Метеоусловия района отличаются частыми инверсиями, застоями воздуха и большим числом дней со штилевой погодой, способствующих осадению из атмосферы и последующему накоплению пыли и поллютантов в депонирующих средах.

В пределах города с юга на север протекает р. Модонкуль, правый приток р. Джиды, длиной 28 км, ширина долины по границе водоразделов –

<sup>1</sup> *Зиновьева И.Г., Соколов А.В., Федоров И.Б., Шульгина Л.И. 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.

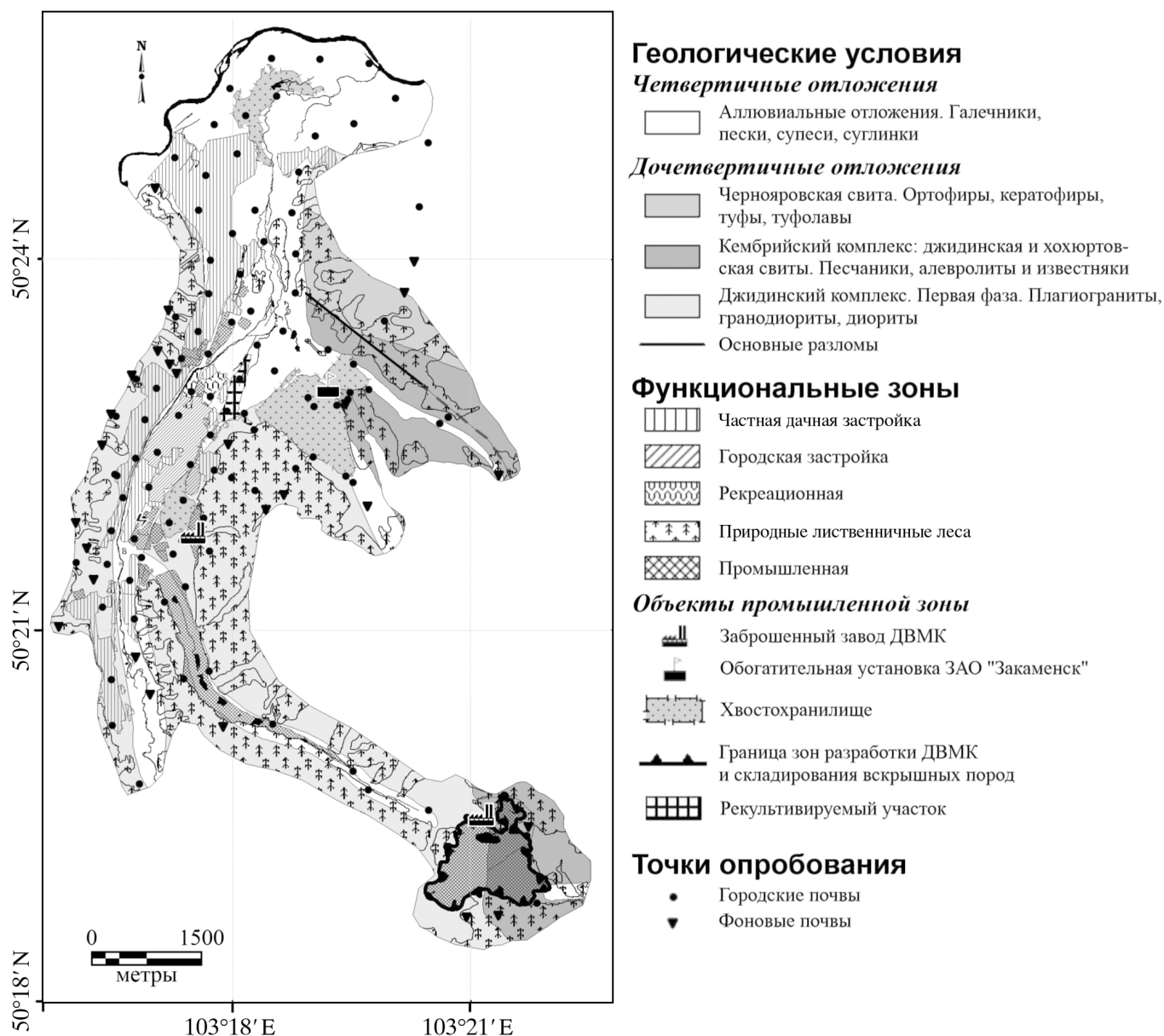


Рис. 1. Геологические условия и функциональные зоны на территории г. Закаменска с точками отбора поверхностных (0–10 см) горизонтов почв.

3–7 км, по днищу – 300–350 м. Коренные берега большей частью крутые, с эрозионным врезом до 2–2.5 м, ширина русла – 10–30 м. Она принимает притоки рек Барун-Нарын и Зун-Нарын, а также руч. Инкур. На первых двух сформированы хвостохранилища, последний превращен в каскад водоемов, используемых для золотодобычи.

В системе почвенного районирования территория г. Закаменска относится к Восточно-Сибирской мерзлотно-таежной зоне бореального пояса Восточно-Саянской горной почвенной провинции [4]. В автономных позициях и на крутых склонах развиты горные дерново-таежные и дерново-кар-

бонатные почвы под лесной растительностью. В межкотловинных понижениях на нижних частях пологих склонов и долинах рек Модонкуль и Джиды под антропогенно-нарушенной луговой, лугово-болотной растительностью распространены дерновые лесные почвы [11], а под луговой с редкими ивняками – аллювиально-луговые.

**Техногенное воздействие.** ДВМК с 1934 по 2001 г. выступал как градообразующее предприятие, где велась эксплуатация месторождений молибдена (Первомайское), вольфрама (Инкурское и Холтосонское рудные, Инкурское и Холтосонское россыпные) и золота (Мыргэншено, Ивановка).

Доля производства вольфрамового концентрата составляла 73–80% от общего объема добычи в СССР. Извлекаемые руды содержали элементы I–III классов опасности – Pb, Zn, F, Mo, W, Be, Bi, As и др. (см. сноску 1). За время работы ДВМК образовалось 44.5 млн т отходов, складированных в двух основных хвостохранилищах – Джидинском (насыпном) и Барун-Нарынском (гидроотвале), и одном аварийном. Из последнего в 2011 г. на первом этапе рекультивации перемещено 3.5 млн т отходов в верхнюю часть Барун-Нарынского хвостохранилища.

В 1999 г. с приобретением в собственность Барун-Нарынского и Джидинского хвостохранилищ ЗАО “Закаменск” начало определять запасы металлов в техногенных песках и вести поиск новейших технологий доизвлечения металлов. В 2010 г. построена фабрика для переработки хвостов ДВМК из вторичного техногенного месторождения Барун-Нарын, отходы которой размещаются в новом хвостохранилище в долине р. Зун-Нарын.

*Функциональная структура города.* В пределах Закаменска выделено пять функциональных зон (рис. 1): две селитебных – многоэтажная и частная дачная; промышленная, транспортная, природно-рекреационная (природные леса, городские парки и зоны отдыха). Жилая многоэтажная застройка занимает пойменные позиции на правом берегу реки, а дачная – на левом, захватывая нижние части склонов речной долины и часть высокой поймы правобережья р. Джиды. Промышленная зона рассредоточена по территории города: часть находится в долине руч. Инкур; ДВМК, ООО “Литейщик” и ТЭЦ – несколько южнее городской застройки; Барун-Нарынское, Зун-Нарынское, Джидинское хвостохранилища расположены к западу от селитебной зоны на правом берегу р. Модонкуль. Модонкульское месторождение техногенных песков сформировалось на левом берегу, где течение реки меняется с меридионального на субширотное направление. К фоновым территориям отнесены вершины и верхние части пологих склонов холмов в долине р. Модонкуль.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геохимическая съемка территории г. Закаменска проводилась летом 2012 г. Образцы почв (132, включая 27 фоновых) отбирались из поверхностного (0–10 см) горизонта по регулярной сетке с шагом 450–650 м (см. рис. 1), что обеспечило высокую пространственную детализацию и возмож-

ность составления крупномасштабных эколого-геохимических карт.

Валовое содержание 54 ТММ в пробах почв определялось масс-спектральным и атомно-эмиссионными методами с индуктивно-связанной плазмой во ВНИИ минерального сырья им. Н.М. Федоровского. Для подробного анализа выбраны 17 основных загрязнителей с атомной массой больше 50 атомных единиц, типичных для Мо–W месторождений [14], 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, кроме того, рассмотрены Sn, Cs, Bi.

Статистическая обработка данных в программных пакетах Statistica 8 и MS-Excel включала вычисление выборочных средних  $M$  и их ошибок, средних квадратичных отклонений  $\sigma$ , коэффициентов вариации ( $C_v = \sigma/M$ ), максимальных и минимальных значений, коэффициентов корреляции ( $r$ ) и других статистических показателей.

Соединения ТММ в фоновых пробах  $C_b$  группировались в зависимости от почвообразующей породы и сравнивались со средними мировыми значениями в почвах  $C$  [30] путем расчета глобальных коэффициентов концентрации и рассеяния  $EF_g = C_b/C$ ,  $DF_g = C/C_b$ . Сравнение со средними мировыми значениями в почвах, а не с кларками литосферы для отдельных типов пород [3, 12, 20] обусловлено тем, что в данной работе рассматриваются только поверхностные горизонты, где велика роль органического вещества.

При оценке геохимической трансформации городских почв учитывалась литогеохимическая неоднородность территории: локальные коэффициенты концентрации  $EF_l = C_l/C_b$  и рассеяния  $DF_l = C_b/C_u$  ( $C_u$  – концентрация элемента в городских образцах) рассчитывались относительно фоновых, относящихся к той же почвообразующей породе. Для построения геохимических спектров фоновых почв, сформированных на разных почвообразующих породах, использовались средние значения  $EF_g$  и  $DF_g$ , а для разных функциональных зон –  $EF_l$  и  $DF_l$ .

Визуализация почвенно-геохимических данных выполнена методом локальной интерполяции, или кригинга, в пакетах MapInfo 11.5 и Surfer 11. Основой геохимических карт послужили фрагмент государственной геологической карты (лист М-48-51-Г, 1997, см. сноску 1) и план города, составленный по космическим снимкам, доступным в системе Геопортала МГУ. Для предотвращения завышенной оценки загрязнения тер-



**Таблица 1.** Уровни загрязнения почв ТМ и металлоидами и соответствующие им градации экологической опасности [8, 14]

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

ритории при интерполяции данных исключались точки с экстремально высокими концентрациями ТММ, во много раз превышающими средний уровень в почвах города [1], которые выделялись по правилу “трех сигм”. На карте они изображены точечными аномалиями.

Ассоциации ТММ в фоновых и городских почвах выявлялись с помощью геохимических спек-

тров и кластерного анализа (алгоритм Complete Linkage). Последний позволяет сгруппировать рассматриваемые элементы в кластеры разного порядка при постепенном снижении порогового значения коэффициента корреляции между валовым содержанием пар элементов из корреляционных рядов.

Влияние природных и антропогенных факторов на пространственное распределение ТММ оценивалось в программном пакете S-Plus (“MathSoft”, 1999) методом регрессионных деревьев, который позволяет прогнозировать уровни содержания элементов в почвах при различных сочетаниях факторов, а также оценивать их значимость. Факторы могут быть представлены не только количественными, но и качественными переменными.

Так как горнопромышленные ландшафты приурочены к природным металлогеническим аномалиям с повышенными концентрациями рудных и сопутствующих элементов, для характеристики полиэлементного загрязнения почв использовали два показателя. Степень геохимической транс-

**Таблица 2.** Средние содержания ТММ в поверхностных (0–10 см) горизонтах фоновых и городских почв г. Закаменска

Среднее содержание, мг/кг	Класс опасности элементов																
	I				II						III				не определен		
	As	Cd	Pb	Zn	Co	Cr	Cu	Ni	Mo	Sb	Ba	Sr	V	W	Bi	Cs	Sn
Фоновые почвы на разных почвообразующих породах ( $n^* = 27$ )																	
Аллювиальные отложения (6)*	7.7	0.3	22.8	98.8	14.8	69.3	35.5	40.2	3.6	2.2	507	290	126	7.1	0.5	16.5	2.9
Палеозойский Джидинский комплекс (15)	4.9	0.4	31.7	133	22.8	47.8	81	34.1	7.8	1.6	698	274	175	34.3	1.3	10.8	2.6
Кембрийский комплекс: Хожуртовская и Джидинская свиты (4)	3.5	0.5	40.5	113	13.6	35.4	39.3	27.8	5.1	1.2	587	205	101	31.2	1.1	5.3	1.7
Среднепермская-нижнетриасовая Черноярская свита (2)	6.6	0.2	16.5	81.5	17	56.5	29.5	25.5	1.4	2.8	655	130	185	4.9	0.3	7.9	2.0
Почвы в функциональных зонах города ( $n = 105$ )																	
Жилая с частной застройкой (24)	6.0	0.6	51.4	150	16.9	67	54	41	8.1	2.3	580	313	149	22.9	2	8.1	3.3
Жилая с городской застройкой (6)	5.0	1.6	58.8	235.0	17.8	58.3	54	41	6.8	2.3	607	332	145	42.5	2.7	10.3	3.5
Промышленная (52)	8.4	4.0	230	332.4	17.2	64.3	141	37.7	34.4	11.7	483	231	144	264	19.9	24.1	4.8
Транспортная (4)	4.9	0.7	58	145.0	14	45	43	25	7.35	2.7	590	335	135	54	2.7	9.8	3.9
Природно-рекреационная (19)	4.7	0.5	41.5	96	20.8	54.6	40	34.1	10.7	1.7	541	242	113	24.5	2.4	5.9	2.6

Примечание. \* $n$  – количество образцов.

формации почвенного покрова под воздействием техногенных источников определялась на основе суммарного показателя загрязнения  $Z_c = \sum EF_i - (n - 1)$ , где  $n$  – число элементов с  $EF_i > 1$ . Экологическая опасность высокого содержания в почвах ТММ оценивалась с помощью интегрального показателя, учитывающего их токсичность:  $ИПЗ = \sum(p \cdot C_u / C) - (n - 1)$ , где  $n$  – число элементов с  $C_u > C$ ,  $p$  – коэффициент токсичности (для элементов I класса опасности  $p = 1.5$ , для II – 1.0, для III – 0.5) [1]. В качестве эталона в этом случае брались глобальные кларки почв [30], а не региональный фон со значительно более высокими концентрациями ТММ, нередко превышающими санитарно-гигиенические нормативы. Градации  $Z_c$  и  $ИПЗ$  приведены в табл. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Уровни содержания ТМ и металлоидов в фоновых и городских почвах.** Все фоновые почвы относительно среднемировых значений обогащены халькофильными элементами (табл. 2): W ( $EF_g = 2.9-20.2$ ), Mo (1.3–7.1), Bi (2.7–3.7), Sb (1.8–4.2). Наибольшие значения глобальных коэффициентов концентрации, свойственные рудным элементам – W и Mo, приурочены к почвам на плагиогранитах, гранодиоритах и диоритах палеозойского возраста джидинского комплекса. Почвы на ортофирах, кератофирах, туфах, туфоллавах среднепермского-нижнетриасового возраста черныяровской свиты обогащены W, Mo, Sb, Cs, Co, Ba и V ( $EF_g = 1.3-4.2$ ) и обеднены всеми остальными элементами.

Наибольшие средние концентрации элементов с установленным классом опасности характерны для поверхностных горизонтов фоновых почв, почвообразующие породы которых представлены плутоническими кислыми породами джидинского комплекса (в мг/кг): I – Zn (134); II – Co (22.8), Cu (81.0) и Mo (7.8); III – Ba (698) и W (34.3). В фоновых почвах на аллювиальных отложениях зафиксированы наибольшие средние значения как опасных элементов – Sr (290 мг/кг), Ni (40.2), Cr (69.3), As (7.7), так и двух с неопределенным классом опасности – Cs (16.5), Sn (2.9). Наименьшие средние концентрации практически всех элементов, за исключением Sb (2.8) и V (185), выявлены в почвах, развитых на основных и средних эффузивных породах черныяровской свиты. Наибольшее рассеяние характерно для Pb ( $DF_g = 1.6$ ) и Cd (2.6).

Во всех фоновых пробах содержание рудных элементов (W–Mo) и их спутников (Bi–Sb) боль-

**Таблица 3.** Геохимическая специализация почв г. Закаменска

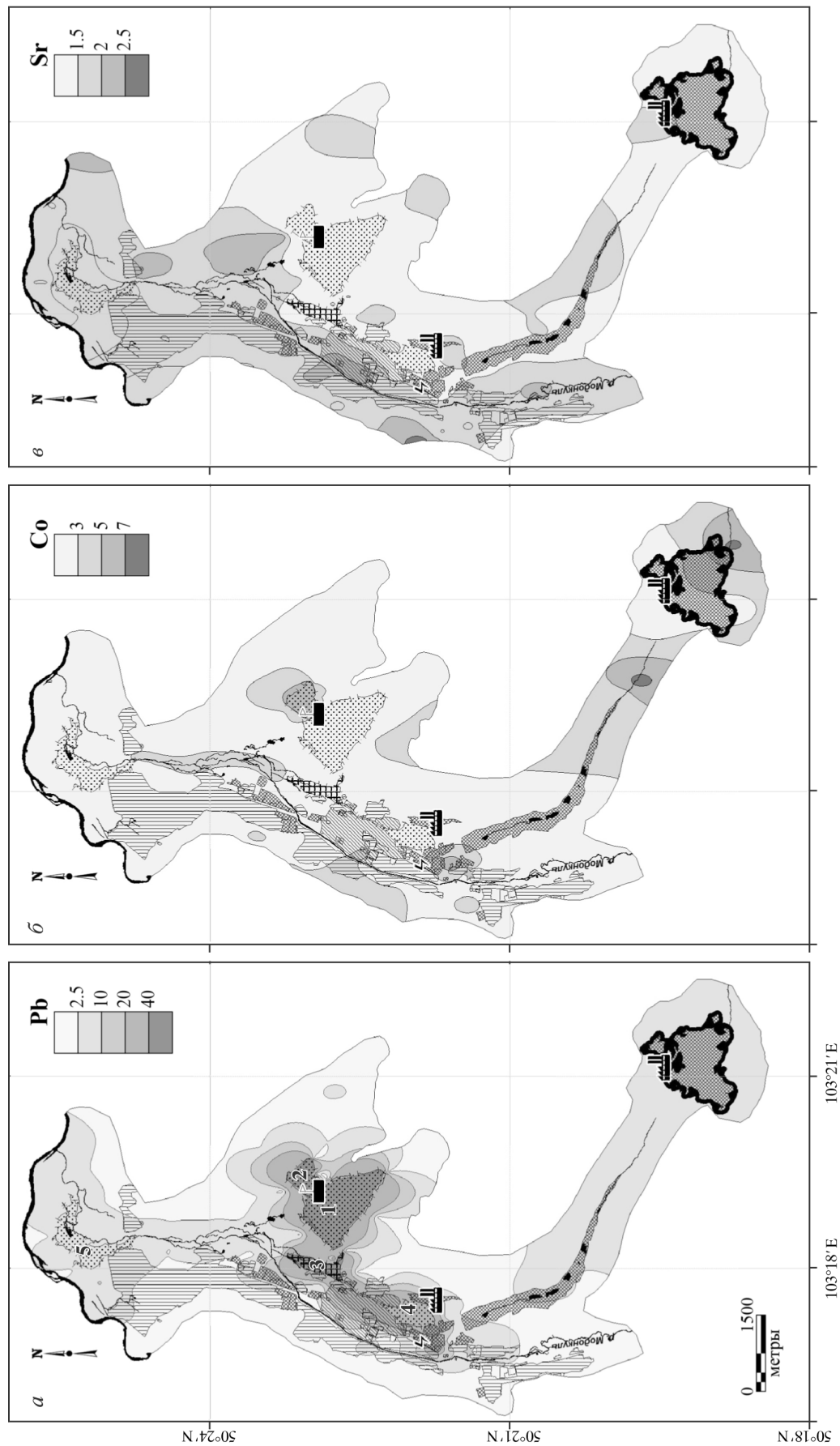
Функциональная зона (количество образцов)	Ассоциация
Жилая с частной застройкой (24)	$Bi_{3.1}W_{2.0}Mo_{1.8}$
Жилая с городской застройкой (6)	$W_{6.0}Bi_{5.2}Cd_{4.8}Pb_{2.6}Zn_{2.4}Cu_{1.5}$
Промышленная (52)	$Bi_{23.6}W_{21.0}Cd_{10.8}Pb_{8.0}Mo_{6.9}Sb_{6.6}$
Транспортная (4)	$W_{7.6}Bi_{5.1}Pb_{2.5}Cd_{2.1}Mo_{2.1}Zn_{1.5}$
Природно-рекреационная (19)	$Bi_{4.3}Mo_{3.0}W_{1.6}Pb_{1.5}$

Примечание. В нижнем индексе указаны значения  $EF$ .

ше среднемировых значений в почвах, что противоречит правилам рудной геохимии, согласно которым фон не может превышать эталонные глобальные значения и кларки литосферы. Это объясняется тем, что изучаемый участок приурочен к границе двух региональных геологических структур: карбонатно-терригенным толщам нижнего палеозоя Джидинского синклиория и интрузивам гранитоидов Модонкульского массива<sup>2</sup>. Фоновые почвы со средними значениями ниже эталонных глобальных концентраций ТММ распространены за границами рассматриваемых геологических структур, они сформировались на иных почвообразующих породах, поэтому не могут служить природными геохимическими аналогами для горнопромышленных ландшафтов Закаменска.

В функциональных зонах города ТММ в почвах образуют несколько групп, которые выделены в зависимости от локальных коэффициентов концентрации  $EF_i$  и рассеяния  $DF_i$  (табл. 3). Элементы с максимальными значениями  $EF_i$ , т.е. приоритетные загрязнители, выявлены в промышленной зоне, их набор совпадает с результатами предшествующих исследований [17]. Основные источники ТММ здесь: 1 – хвостохранилища с высоким содержанием этих элементов, унаследованным от исходных руд [25]; 2 – ООО “Литейщик”, специализирующийся на литье чугуна и стали, в выбросах которого присутствуют W, Sb, Mo, Pb, Cu, Cr [14]; 3 – ТЭЦ, функционирующая на мазу-

<sup>2</sup> *Патов 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 гос. сельхозакадемия им. В.Р. Филиппова”, 2007. 259 с.



**Рис. 2.** Распределение локального коэффициента концентрации  $EF_i$ ; *a* – Pb, *б* – Co, *в* – Sr в поверхностном (0–10 см) горизонте почв и ТПО г. Закаменска. Хвостохранилища: **1** – Барун-Нарынское, **2** – Зун-Нарынское; **3** – аварийное; **4** – Джидинское; **5** – Модонкульское.

те, минеральные компоненты которого включают соединения V, Ni, Cr, Mo, Pb, Cu [14, 37].

Активная дефляция, водная эрозия, плоскостной смыв и химическое сернокислое выветривание техногенных песков Джидинского хвостохранилища привело к увеличению скорости латеральной миграции ТММ в направлении соседствующей с ним жилой зоны с многоэтажной застройкой (см. табл. 3). Наименее загрязнены почвы селитебной зоны с дачной застройкой, которые расположены в основном на левом берегу р. Модонкуль, где отсутствуют места складирования отходов производства. В ней выявлены повышенные содержания рудных элементов W, Mo и их спутника Bi ( $EF_i = 1.6-4.3$ ), содержания всех остальных элементов близки к фоновым.

Приоритетные загрязнители – халькофильные элементы W, Bi, Cd, Pb, Mo. Поведение катионно-генных элементов Bi, Cd, Pb отличает миграция в кислых водах в форме истинных растворов, а в слабокислых и нейтральных – в виде органических высокомолекулярных комплексов [21]. W – комплексообразователь, слабо мигрирующий в сильнощелочных (содовых) водах; Mo – аниогенный элемент, осаждающийся с органикой, гидроксидами Fe и Al и мигрирующий в щелочных условиях [6].

#### **Пространственное распределение ТММ в поверхностных горизонтах городских почв.**

Распределение загрязнителей в почвенном покрове города рассмотрено для ТММ из нескольких парагенетических ассоциаций, выявленных с помощью кластерного анализа, элементы которых характеризуются общими зонами выноса и аккумуляции в почвах [15]. Две устойчивые полиэлементные ассоциации Cs–W–Bi–Cu–Zn–Cd–Sn и As–Sb–Pb–Mo имеют общую зону аккумуляции в центре города, включающую аварийное, Барун-Нарынское, Зун-Нарынское и Джидинское хвостохранилища (рис. 2а). На участке аварийного сброса 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 вымывание 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 14–6 раз.

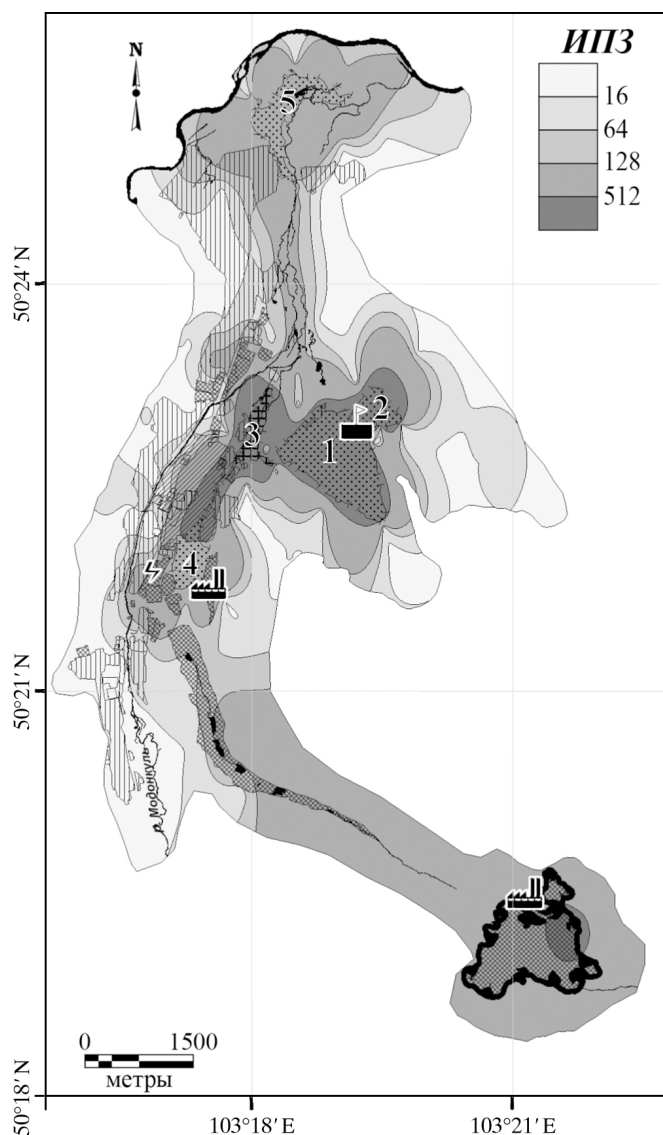
В Барун-Нарынском и Зун-Нарынском хвостохранилищах коэффициенты концентрации  $EF_i$  для элементов из двух полиэлементных ассоциаций

составляют: Bi – 69 и 70, Sb – 49 и 11, W – 35 и 45, Pb – 32 и 27, Cd – 28 и 23, Cs – 18 и 19, Mo – 11 и 4, Sn – 10 и 6, Cu – 10 и 9, Zn – 10 и 8, As – 5 и 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 [23, 24]. Средние содержания в этой зоне аккумуляции превышают фоновые для Sb в 48 раз, Cd, Pb, Bi – 38–31, W, Cu – 29–26, Zn, Cs, Mo, As, Sn – в 9–4 раза.

Все элементы выделенных парагенетических ассоциаций, за исключением литофильного Cs, относятся к группе халькофильных, встречающихся в природе преимущественно в виде сульфидных минералов. Их источником, вероятнее всего, являются сульфидно-вольфрамовые Инкурское и Холтосонское рудные и россыпные месторождения, разрабатываемые ранее ДВМК.

Ассоциация Cs–W–Bi–Cu–Zn–Cd–Sn образует 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. Вторая зона аккумуляции – техногенное Модонкульское месторождение, расположенное ниже хвостохранилищ и сложенное в основном мелкозернистыми песками, имеет в разрезе тонкую ритмичную, подобную ленточной, слоистость, отражающую периодические крупные разливы р. Модонкуль. Осаждение ТММ происходит на седиментационном геохимическом барьере, где река резко меняет направление течения с меридионального на субширотное [25]. Поверхностные горизонты почв и техногенных поверхностных образований (ТПО) в этой части долины р. Модонкуль характеризуются превышением фоновых значений для Bi в 38, W – 20, Cd – 9, Sn – 5, Cs, Zn – 3, Cu – 2 раза.

Локализация максимумов ассоциации V–Co отчасти совпадает с распределением двух других ассоциаций (рис. 2б). Наиболее высокие концентрации приурочены к действующему хвостохранилищу в долине р. Зун-Нарын, где содержания V и Co достигают 150 и 49 мг/кг, соответственно, что в 1.8 и 3.6 раза выше фона. Вторая зона аккумуляции – средняя часть долины р. Модонкуль, где оба максимума связаны с присутствием этих элементов в породах W–Mo месторождений [18].



**Рис. 3.** Распределение интегрального показателя загрязнения в поверхностном горизонте почв и ТПО г. Закаменска. Хвостохранилища: 1 – Барун-Нарынское, 2 – Зун-Нарынское; 3 – аварийное; 4 – Джидинское; 5 – Модонкульское.

В запруженной долине р. Инкура значения  $EF_7$  для рассматриваемых элементов достигают 1.3 и 5.2. 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. Это вызвало частичное уничтожение почвенного покрова, изменение рельефа местности и загрязнение почв и вод широким спектром ТММ [25].

Иной характер распределения в городских почвах имеют Sr и Ba, образующие четвертую ассоциацию (рис. 2в): концентрации Sr в поверхностном слое почв варьируют в пределах 250–350 мг/кг, Ba – 450–650 мг/кг. Наименьшее содержание выявлено 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 [6]. 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 пределы хвостохранилища.

Ассоциация Cr–Ni по своему поведению в земной коре занимает промежуточное положение между петрогенными и металлогенными элементами [16]. Она образует три контрастные аномалии в почвенном покрове города. Первая в Зун-Нарынском хвостохранилище имеет концентрации Cr 140 и Ni 69 мг/кг с превышением фона в 3.9 и 2.5 раза, соответственно. Причины высокого содержания этих элементов – повышенная обводненность хвостохранилища и, как следствие, восстановительные условия, в которых Cr и Ni обладают низкой подвижностью [6].

Вторая аномалия с максимальными концентрациями Cr 67 и Ni 92 мг/кг сформировалась на юге селитебной зоны. В ее центре расположена ТЭЦ, где используется мазут, сжигание которого вызывает загрязнение атмосферы и, как результат, почвенного покрова этими элементами. В третьей зоне аккумуляции на юго-востоке города накапливаются продукты делювиального смыва с поверхности отвалов вскрышных пород, в которых концентрации рудных элементов ниже промышленного уровня, а Cd, Co, Ni и Cr – повышены [24].

**Оценка полиэлементного загрязнения почвенного покрова.** Для комплексной эколого-геохимической оценки загрязнения почвенного покрова города применяли два интегральных показателя. Традиционно контрастность техногенных аномалий оценивают с помощью  $Z_c$  [8, 14], который характеризует степень загрязнения почв ассоциацией элементов относительно фона. Однако горнопромышленные ландшафты, в которых ведется добыча цветных металлов, формируются в районах с высоким фоновым содержанием многих элементов. Поэтому при определении экологической опасности загрязнения почв целесообразно

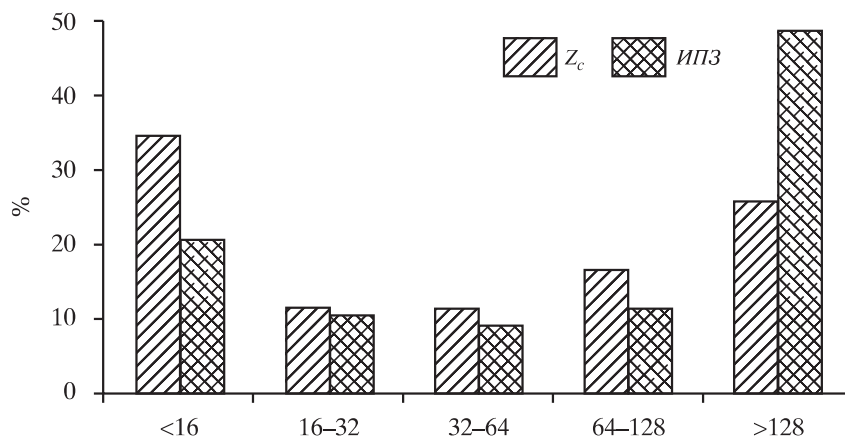


Рис. 4. Распределение площадей почв г. Закаменска по грациям  $Z_c$  и  $ИПЗ$ .

использовать интегральный показатель загрязнения, который рассчитывается относительно среднемировых содержаний в почвах и учитывает токсичность ТММ.

Значения  $ИПЗ$  отличаются большей вариабельностью, что упрощает выделение зон с разными категориями опасности загрязнения. Разброс  $ИПЗ$  составляет 0.4–1737 при среднем значении 93, соответствующем очень опасному уровню (см. табл. 1). В то же время суммарный показатель загрязнения  $Z_c$  колеблется от 1 до 721 при среднем значении 53.1, что указывает на высокий уровень загрязнения. Среднее значение  $ИПЗ$  в 1.75 раза превышает  $Z_c$ , а максимальное – в 2.4 раза.

Сравнительный анализ карт  $Z_c$  и  $ИПЗ$  выявил сходство их пространственного распределения, особенности каждого и локализацию аномалий. Наиболее контрастная аномалия приурочена к рекультивированному в 2011 г. аварийному хвостохранилищу (рис. 3), без растительного покрова, и где верхний слой представляет собой смесь погребенного более 70 лет назад гумусового горизонта и отходов ДВМК. Значения  $Z_c$  достигают здесь 485–721, а  $ИПЗ$  – 823–1737, превышая чрезвычайно опасный уровень в 3–5 и 6–14 раз, соответственно. Вторая аномалия в Зун-Нарынском хвостохранилище менее контрастна – максимум  $Z_c$  составляет 292, а  $ИПЗ$  – 851. Третья аномалия на Модонкульском техногенном месторождении со средними  $Z_c = 140$  и  $ИПЗ = 505$  находится на левом берегу реки. Четвертая зона аккумуляции захватывает территорию закрытой более 10 лет назад фабрики ДВМК, Джидинского хвостохранилища и аварийного канала сброса хвостов. Здесь максимум  $Z_c$  достигает 265, а  $ИПЗ$  – 702 с превышением критического уровня более чем в 2 и 5.5 раза, соответственно. На юго-востоке горо-

да, у подножия отвалов вскрышных пород, из-под которых вытекает р. Гуджирка, выявлена точечная аномалия с  $Z_c = 238$  и  $ИПЗ = 770$ .

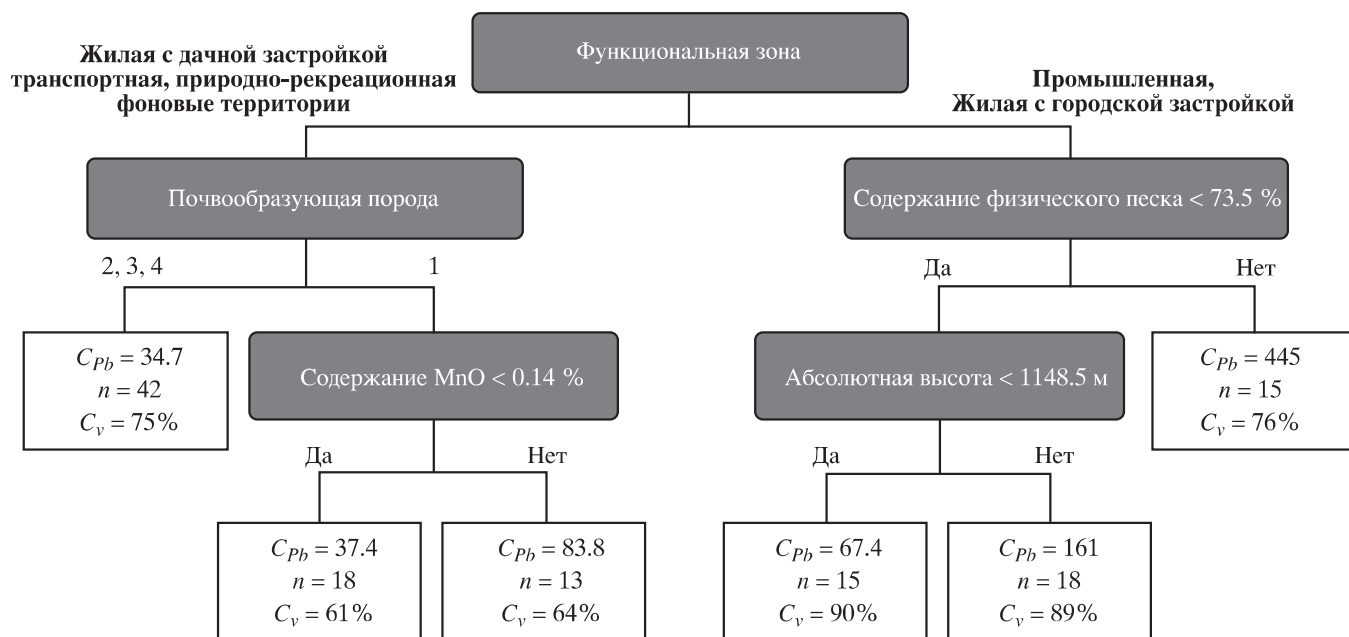
Анализ пространственного распределения показателя  $ИПЗ$  в отличие от  $Z_c$  позволяет выделить в почвах еще несколько контрастных аномалий (см. рис. 3). Во-первых, это территория долины р. Инкура, где возобновлена добыча россыпного Au и W, со средним значением  $ИПЗ$  300, а максимальным – 330. Во-вторых, это 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.

Соотношение площадей с различными уровнями  $Z_c$  и  $ИПЗ$  представлено на рис. 4. При расчете суммарного показателя загрязнения почв  $Z_c$  относительно локальных фоновых значений 35% площади имеют низкий уровень загрязнения с  $Z_c < 16$  и лишь 26% – максимальный. При использовании  $ИПЗ$  зона экологического бедствия включает практически половину города (49%), и более 10% имеют очень опасную степень экологической опасности. К слабо загрязненным территориям относятся 20% площади города, что в 1.5 раза меньше, чем при расчете  $Z_c$ . Эти участки без активного влияния горнодобывающего комплекса в основном приурочены к вершинам и склонам на левом борту долины р. Модонкуль.

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 [7]. Однако по величине суммарного показателя загрязнения  $Z_c$  только на 25.5% площади







**Рис. 5.** Распределение Pb в почвенном покрове г. Закаменска в зависимости от антропогенных и природных факторов. В серых прямоугольниках указаны факторы дифференциации, в квадратах – средние содержания Pb ( $C_{Pb}$ , мг/кг), объем подвыборки ( $n$ ) и коэффициент вариации ( $C_v$ ). Почвообразующие породы: 1 – аллювиальные отложения; 2 – чернорядовская свита; 3 – кембрийский комплекс; 4 – палеозойский джидинский комплекс.

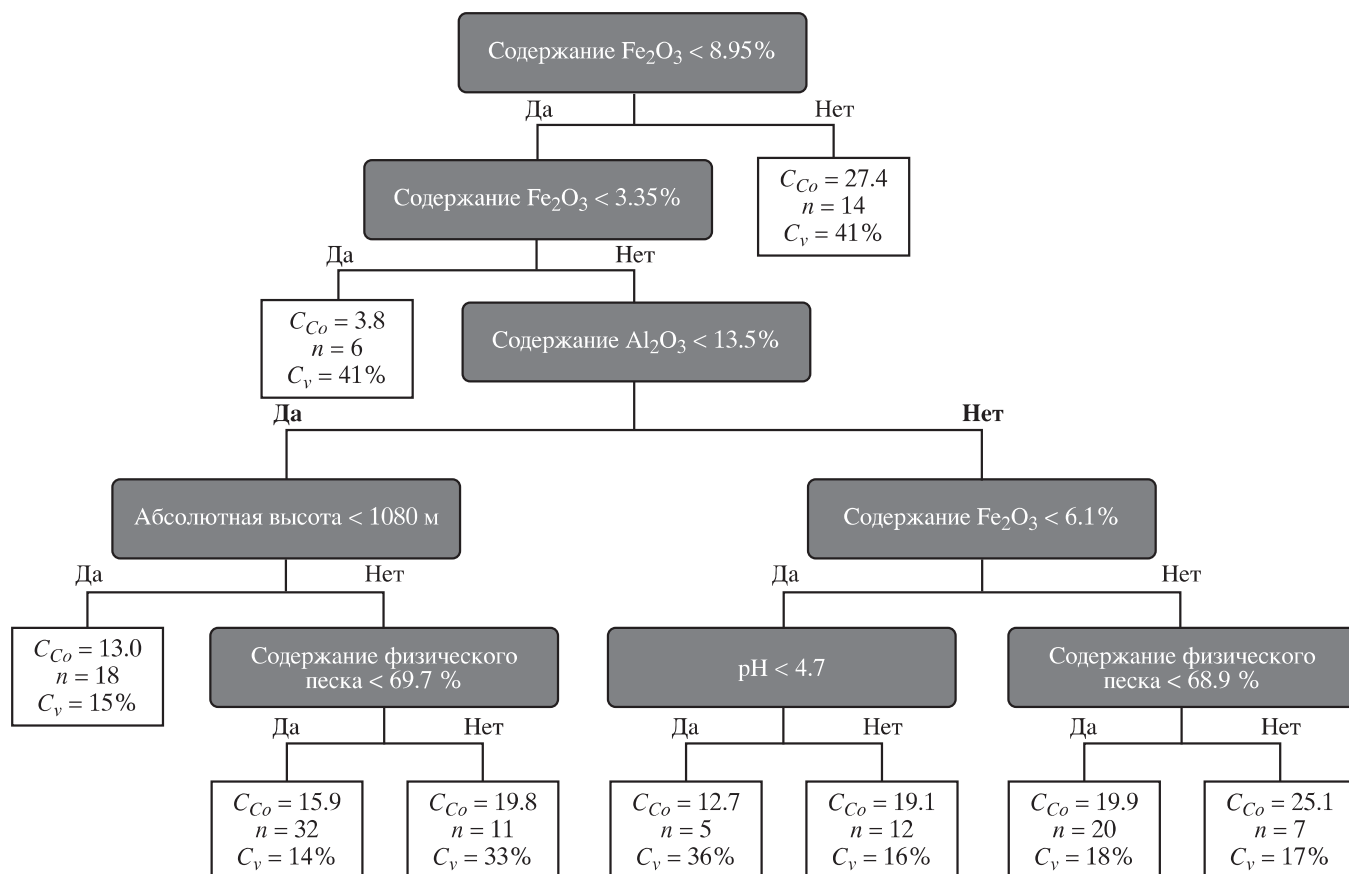
города он превышает 128. При анализе состояния здоровья населения и эколого-геохимической оценки в качестве показателя полиэлементного загрязнения почвенного покрова предпочтительнее использовать ИПЗ, который рассчитывается относительно среднемирового значения в почвах, поскольку горнопромышленные ландшафты формируются в условиях высокой литолого-геохимической неоднородности и природной аномалии рудных элементов и их спутников. Этот показатель рассматривает не только негативное воздействие на здоровье населения загрязнения городской среды в результате антропогенной деятельности, но и неблагоприятные природные особенности территории, которые не учитывают суммарный показатель загрязнения  $Z_c$ .

**Влияние природных и антропогенных факторов на дифференциацию городских почв по содержанию ТМ и металлоидов.** Роль природных и антропогенных факторов, обуславливающих пространственные различия 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) абсолютных отметок рельефа, характеризующих геохимическую позицию элементарного ландшафта или приуроченность к искусственным аккумулятивным формам (хвостохранилищам, отвалам вскрышных пород и т.д.) в промышленной зоне; 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).

По связи с теми или иными факторами все элементы разделяются на три группы. Первая наиболее многочисленна – Bi, Cd, Cs, Cu, Sn, W, Zn, As, Mo, Pb, Sb, концентрации которых в городских почвах контролируются уровнем антропогенного воздействия на изучаемые ландшафты (табл. 4). 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. Этот же фактор проявляется и в жилой многоэтажной застройке по отношению к халькофильным элементам – Zn, Cd, Sn, As, Mo, Pb (рис. 5). Их аккумуляцию можно объяснить близостью сильноокислого Джидинского хвостохранилища с сульфидным спецотвалом, который сформировал геохимическую обстановку, усиливающую миграционную способность этих элементов в почвах. Из-за прекращения контроля экологического состояния хвостохранили-





**Рис. 6.** Распределение  $Co$  в почвенном покрове г. Закаменска в зависимости от природных и антропогенных факторов. В серых прямоугольниках указаны факторы дифференциации, в квадратах – средние значения содержания  $Co$  ( $C_{Co}$ , мг/кг), объем подвыборки ( $n$ ) и коэффициент вариации ( $C_v$ ).

ща после закрытия ДВМК произошло высыхание хвостохранилища и активизировалась 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,  $Bi$  – 38.0,  $Sb$  – 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  $Cs$ ,  $Pb$  и  $Zn$ , гумуса –  $Sn$  и  $W$ .

Для природно-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. 4). Для  $Bi$  и  $Pb$  – это приуроченность к геологическим структурам;  $Cd$ ,  $Cs$  и  $Mo$  – геохимическая позиция;  $Sb$  – содержание гумуса;  $Zn$  и  $Cu$  – концентрации оксидов  $Al$  и  $Fe$ , соответственно;  $Sn$  и  $As$  – количество физической глины.

Содержание  $Co$ ,  $V$ ,  $Cr$  и  $Ni$  практически полностью контролируется физико-химическими свойствами почв (см. табл. 4, рис. 6), влияние ландшафтно-геохимических условий имеет второстепенное значение. Наиболее значимый фактор – количество оксидов  $Fe$ , поэтому наибольших средних значений  $Ni$  (40.4 мг/кг) и  $V$  (216) достигают при  $Fe_2O_3 > 4.2\%$ .

$Va$  и  $Sr$  имеют близкое пространственное распределение, однако факторы, оказывающие наибольшее воздействие, 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 (абс. высота < 1096 м) 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 илстой фракции > 2.5%) барьерам.

Таким образом, пространственные различия в уровнях содержания ТММ в поверхностных горизонтах почв и ТПО г. Закаменска обусловлены в основном уровнем техногенной нагрузки, варьирующей в зонах различного функционального назначения, и в меньшей степени – природными особенностями горнопромышленных ландшафтов.

## ВЫВОДЫ

1. Горнопромышленные ландшафты отличает высокое содержание в почвах рудных элементов (W, Mo) и их спутников (Bi, Sb), что является следствием техногенного изменения природной среды при изъятии из недр концентрированных скоплений полезных компонентов. Наиболее сильно загрязнены почвы промышленной зоны –  $Bi_{23.6}W_{21.0}Cd_{10.8}Pb_{8.0}Mo_{6.9}Sb_{6.6}$  за счет интенсивного физического и химического выветривания материала хвостохранилищ. Загрязнение почв  $W_{6.0}Bi_{5.2}Cd_{4.8}Pb_{2.6}Zn_{2.4}Cu_{1.5}$  соседствующей с ней жилой многоэтажной застройки вызвано латеральной миграцией ТММ из хвостохранилищ, а также использованием отходов ДВМК в строительстве зданий, детских площадок и дорог.

2. Выявлены парагенетические ассоциации ТММ, обладающие сходным поведением и распределением в поверхностных горизонтах почв, установлены ведущие факторы их пространственной дифференциации. Две устойчивые полиэлементные ассоциации Cs–W–Bi–Cu–Zn–Cd–Sn и As–Sb–Pb–Mo образуют высококонтрастные аномалии из отходов ДВМК в почвах центральной части города. В долине р. Инкура установлено повышенное содержание V–Co, связанное с возобновлением разработки Au–W россыпи. Распределение Sr–Ba с околочларковыми содержаниями в городских почвах довольно однородно. Ассо-

циацию Sr–Ni отличает контрастная аномалия на юге Закаменска, сформированная выбросами работающей на мазуте ТЭЦ. Ведущий фактор накопления в почвах большинства рассматриваемых элементов – уровень техногенной нагрузки, обусловленный функциональной принадлежностью территории. Интенсивность аккумуляции остальных металлов (Co, V, Cr, Ni, Ba, Sr) определяется ландшафтно- и почвенно-геохимическими условиями.

3. Почвенный покров Закаменска имеет высокую степень техногенной нарушенности, что подтверждают результаты оценки его полиэлементного загрязнения. Средний по городу уровень загрязнения ТММ соответствует очень опасному, половина площади города относится к зоне экологического бедствия, 20% – к слабозагрязненным территориям. Максимальные значения ИПЗ приурочены к аварийному хвостохранилищу, в 14 раз превышая критический уровень 128.

4. Проведенные исследования показали необходимость учета в эколого-геохимических оценках геологической неоднородности и металлогенической специфики горнопромышленного района. Геохимические коэффициенты  $EF_i/DF_i$  должны рассчитываться не относительно среднего регионального фона, а по отношению к индивидуальному для каждой почвообразующей породы фоновому значению, что позволит более точно определить степень техногенной геохимической трансформации почв. Для оценки экологической опасности полиэлементного загрязнения в условиях повышенного геохимического фона целесообразно использовать показатель ИПЗ, который рассчитывается относительно глобальных кларков и учитывает токсичность элементов.

*Химико-аналитические работы и их интерпретация выполнены при поддержке РНФ (проект № 14-27-00083).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков В.А., Водяницкий Ю.Н., Борисочкина Т.И., Кахнович З.Н., Мясников В.В. Методические рекомендации по оценке загрязненности городских почв и снежного покрова тяжелыми металлами. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 1999. 32 с.
2. Гордиенко И.В., Ковач В.П., Елбаев А.Л., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Резницкий Л.З., Яковлева С.З., Анисимова И.В. Возраст и условия формирования коллизионных гранитоидов Джидинской зоны Центрально-азиатского складчатого пояса, юго-западное Забайкалье // Петрология. 2012. Т. 20. № 1. С. 45–65.

3. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.
4. Добровольский В.В., Урусевская И.С. География почв. М.: Изд-во МГУ, КолосС, 2004. 460 с.
5. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 253 с.
6. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник в 6 кн. Кн. 4: Главные d-элементы. М.: Экология, 1995. 416 с.
7. Иметхенов А.Б., Доржиев Ц.З., Максарова Д.Д., Манкетова А.А. Воздействие техногенных загрязнений Джидинского вольфрамо-молибденового комбината на здоровье детей г. Закаменска (Республика Бурятия) // Вестн. Бурятского гос. ун-та. 2015. № 4. С. 229–236.
8. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
9. Касимов Н.С., Битюкова В.Р., Кислов А.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М., Малхазова С.М., Шартова Н.В. Проблемы экогеохимии крупных городов // Охрана и разведка недр. 2012. № 7. С. 8–13.
10. Ладонин Д.В. Соединения тяжелых металлов в почвах – проблемы и методы изучения // Почвоведение. 2002. № 6. С. 682–692.
11. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 312 с.
12. Овчинников Л.Н. Прикладная геохимия. М.: Недра, 1990. 248 с.
13. Пояснительная записка о ходе реализации республиканской целевой программы “Экологическая безопасность в республике Бурятия на 2009–2011 года и на период до 2017 г.”. Улан-Удэ: Мин-во природных ресурсов Республики Бурятия, 2011 г.
14. Саэт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
15. Самонова О.А., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С. Ассоциации микроэлементов в профиле дерново-подзолистых почв южной тайги // Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение. 1998. № 2. С. 14–19.
16. Сауков А.А. Геохимия. М.: Наука, 1975. 477 с.
17. 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.
18. Смирнова О.К., Ходанович П.Ю., Яценко Р.И. Тяжелые металлы в техногенных ландшафтах района Джидинского горно-обогатительного комбината // Тр. II Всерос. симп. “Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий” и VIII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана “Современное минералообразование”. Чита: ИПРЭК СО РАН, 2006. С. 82–87.
19. Тацый Ю.Г. Эколого-геохимическая оценка загрязнения окружающей среды в зоне действия Карабашского медеплавильного комбината // Вест. Тюменского гос. ун-та. 2012. № 12. С. 81–86.
20. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
21. Удачин В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала // Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Миасс: ФГБУ ИМ УО РАН, 2012. 352 с.
22. Уфимцев Г.Ф. Горные пояса континентов и симметрия рельефа Земли. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. 168 с.
23. 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. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. С. 142–151.
24. Ходанович П.Ю., Смирнова О.К., Яценко Р.И., Тулохонов А.К., Абидуева Т.И., Михеева А.С. Состояние природных сред и экосистем территории, прилегающей к промплощадкам Джидинского ГОКа // Закамна в XXI веке. Матер. науч.-практ. конф. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2002б. С. 122–131.
25. 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. 2002а. № 12. С. 52–59.
26. 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 // Тр. II Всерос. симп. “Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий” и VIII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана “Современное минералообразование”. Чита: ИПРЭК СО РАН, 2006. С. 138–143.
27. Candeis C., Ferreira Da Silva E., Salgueiro A.R., Pereira H.G., Reis A.P., Patinha C., Matos J.X., Avila P.H. Assessment of soil contamination by potentially toxic elements in the Aljustrel mining area in order to implement soil reclamation strategies // Land degradation & Development. 2011. V. 22. P. 564–585.
28. Garcia-Sanchez A., Alonso-Rojo P., Santos-Frances F. Distribution and mobility of arsenic in soils of a mining area (Western Spain) // Science of the Total Environment. 2010. V. 408. P. 4194–4201.

29. Gedgafova F., Uligova T.S. Heavy metals in Natural and Technogenic Ecosystems of the Central Caucasus // Russian J. of Ecology. 2007. V. 38. № 4. P. 295–298.
30. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, Fourth Edition. CRC Press, 2011. 548 p.
31. Lizarraga-Mendiola L., Gonzalez-Sandoval M.R., Duran-Dominguez M.C., Marquez-Herrera C. Geochemical behavior of heavy metals in Zn-Pb-Cu mining area in the State of Mexico (Central Mexico) // Environ Monit Assess. 2009. V. 155. P. 355–372.
32. Loreda J., Ordonez A., Alvarez R. Environmental impact of toxic metals and metalloids from the Munon Cimero mercury-mining area (Asturias, Spain) // J. of Hazardous Materials. 2006. V. A136. P. 455–467.
33. Milu V., Lerroy J.L., Peiffert C. Water contamination downstream from a copper mine in the Apuseni Montains, Romania // Environmental Geology. 2002. V. 42. P. 773–782.
34. Rey J., Martinez J., Hidalgo M.C., Rojas D. Heavy metal pollution in the Quaternary Garza basin: A multidisciplinary study of the environmental risks posed by mining (Linares, southern Spain) // Catena. 2013. V. 110. P. 234–242.
35. Serbula S.M., Miljkovic D.Dj., Kovacevic R.M., Ilic A.A. Assessment of airborne heavy metals pollution using plant parts and topsoil // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2012. V. 76. P. 209–214.
36. Timofeev I.V., Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Gunin P.D., Enkh-Amgalan S. Geochemical transformation of soil cover in copper–molybdenum mining areas (Erdenet, Mongolia) // J. Soils Sediments. 2015. doi: 10.1007/s11368–015–1126–2
37. Vodyanitskii Yu.N., Savichev A.T., Trofimov S.Ya., Shishkonakova E.A. Accumulation of Heavy Metals in Oil Contaminated Peat Soils // Eurasian Soil Science. 2012. V. 45. № 10. P. 977–982.
3. Grigoriev, N.A. *Raspreделение khimicheskikh elementov v verkhnei chasti kontinentalnoi kory* [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2009, 383 p. (in Russian).
4. Dobrovolskii, V.V., Urusevskaya, I.S. *Geografiya pochv* [Geography of soils]. Moscow, MSU Publ., Kolos, 2004, 460 p. (in Russian).
5. Elpat'evskii, P.V. *Geokhimiya migratsionnykh potokov v prirodnykh i prirodno-technogennykh geosistemakh* [Geochemistry of migration fluxes in natural and natural-technogenic geosystems]. Moscow, Nauka Publ., 1993, 253 p. (in Russian).
6. Ivanov, V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: spravochnik v 6 kn.* [Ecological geochemistry of elements: a reference book in 6 volumes. Vol. 4: Rare d-elements]. Moscow, Ekologiya, 1995, 416 p. (in Russian).
7. Imetkhenov, A.B., Dorzhiev, Ts.Z., Maksarova, D.D., Manketova, A.A. *Vozdeistvie tekhnogennykh zagryaznenii Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata na zdorov'e detei g. Zakamenska (Respublika Buryatia)* [Technogenic pollution impact of Dzhida tungsten-molybdenum ore processing plant on children health in Zakamensk city (Buryat Republic)], *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, no. 4, pp. 229–236 (in Russian).
8. Kasimov, N.S. *Ekogeokhimiya landshavtov* [Landscape ecogeochemistry], Moscow, IP Filimonov M.V., 2013, 208 p.
9. Kasimov, N.S., Bitukova, V.R., Kislov, A.V., Kosheleva, N.E., Nikiforova, E.M., Malkhazova, S.M., Shartova, N.V. *Problemy ekogeokhimii krupnykh gorodov* [Ecogeochemical problems in large cities]. *Okhrana i razvedka nedr*, 2012, no. 7, pp. 8–13 (in Russian).
10. Ladonin, D.V. *Soedineniya tyazhelykh metallov v pochvakh – problemy i metody izucheniya* [Heavy metal compounds in soils: problems and methods of study]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2002, no. 6, pp. 682–692 (in Russian).
11. Nogina, N.A. *Pochvy Zabaikalia* [Transbaikalian soils]. M., Nauka Publ., 1964, 312 p. (in Russian).
12. Ovchinnikov, L.N., *Prikladnaya geokhimiya* [Applied geochemistry]. M., Nedra Publ., 1990, 248 p. (in Russian).
13. *Poyasnitel'naya zapiska o khode realizatsii respublikanskoi tselevoi programmy "Ekologicheskaya bezopasnost' v respublike Buryatii na 2009–2011 god i na period do 2017 goda"* [Explanatory note on the progress in implementation of the Republican purpose-oriented program "Environmental safety of Buryatia Republic in 2009–2011 and for the period until 2017"]. *Ministerstvo prirodnykh resursov respubliki Buryatii*, 2011 (in Russian).
14. Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P. et al. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy* [Geochemistry of

## REFERENCES

1. Bolshakov, V.A., Vodyanitskii, Yu.N., Borisochkina, T.I. et al. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke zagryaznenosti gorodskikh pochv i snezhnogo pokrova tyazhelymi metallami* [Methodical recommendations on the assessment of urban soils and snow cover pollution with heavy metals], Moscow, Dokuchayev Soil Science Institute Publ., 1999, 32 p. (in Russian).
2. Gordienko, I.V., Kovach, V.P., Elbaev, A.L., Kotov, A.B., Sal'nikova, E.B., Reznitskii, L.Z., Yakovleva, S.Z., Anisimova, I.V. *Vozrast i usloviya formirovaniya kollizionnykh granitoidov Dzhidinskoi zony Tsentral'no-aziatskogo skladchatogo poyasa, yugo-zapadnoe Zabaikalie* [Age and formation conditions of collision granitoids of Dzhida zone in the Central-Asian fold belt, southwestern Transbaikalia]. *Petrologiya*, 2012, vol. 20, no. 1, pp. 45–65 (in Russian).

- the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p. (in Russian).
15. Samonova, O.A., Kosheleva, N.E., Kasimov, N.S. Assotsiatsii mikroelementov v profile dernovo-podzolistykh pochv yuzhnoi taigi [Trace elements associations in soddy-podzolic soil profiles cut in south boreal forest]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seria 17: Pochvovedenie*, 1998, no. 2, pp. 14–19 (in Russian).
  16. Saukov, A.A. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 477 p. (in Russian).
  17. Smirnova, O.K., Plusnin, A.M. Dzhida rudnyi raion (problemy sostoyaniya okruzhayushei sredy) [The Dzhida ore mining region (environmental problems)]. Ulan-Ude, BGSA Publ., 2013, 181 p. (in Russian).
  18. Smirnova, O.K., Khodanovich, P.Yu., Yatsenko, R.I. Tyazhelye metally v tekhnogennykh landshaftakh raiona Dzhidinskogo obogatitel'nogo kombinata [Heavy metals in technogenic landscapes near Dzhida mining and processing integrated plant]. *Materialy II Vserossiiskogo simpoziuma "Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territorii" i VIII Vserossiiskikh chtenii pamyati akademika A.E. Fersmana "Sovremennoe mineraloobrazovanie"* [Proceedings of II All-Russian Symposium on the mineralogy and geochemistry of mining landscapes and VIII All-Russian Readings in memory of A.E. Fersman on recent mineral formation], Chita, 2006, pp. 82–87 (in Russian).
  19. Tatsii, Yu.G. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka zagryazneniya okruzhayushchei sredy v zone deistviya Karabashskogo medeplavil'nogo kombinata* [Ecological and geochemical assessment of environmental pollution in the zone affected by the Karabash copper plant]. *Vestnik Tumenskogo gos. universiteta*, 2012, no. 12, pp. 81–86 (in Russian).
  20. Teylor, S.P., McLennan, S.M., *Kontinentalnaya kora: ee sostav i evolyutsiya* [Continental crust: composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 1988, 384 p. (in Russian).
  21. Udachin, V.N., *Ekogeokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala* [Mining technogenesis ecogeochemistry in the Southern Ural], Diss. PhD, Miass, 2012, 352 p. (in Russian).
  22. Ufimtsev, G.F. *Gornye poyasa kontinentov i simmetriya reliefa Zemli* [Mountain belts of continents and relief symmetry of the Earth]. Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. Otdelenie, 1991, 168 p. (in Russian).
  23. Khodanovich, P.Yu. *Lezhalye otkhody obogashcheniya Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata kak kompleksnye tekhnogennyye mestorozhdeniya* [Mature tailings of the Dzhida tungsten–molybdenum plant as complex technogenic deposits]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya mineral'no-sir'evogo i gornodobyvaushchego kompleksa respubliki Buryatia* [The present and the future of the mineral resource and mining industry in the Buryat Republic]. Ulan-Ude, BNC SO RAN Publ., 1999, pp. 142–151 (in Russian).
  24. Khodanovich, P.Yu., Smirnova, O.K., Yatsenko, R.I., Tulokhonov, A.K., Abidueva, T.I., Mikheeva, A.S. *Sostoyanie prirodnykh sred i ekosistem territorii, prilegayushchei k prompleshchadke Dzhidinskogo GOKa* [State of the environment and ecosystems near Dzhida mining and processing integrated plant]. *Zakamna v XXI veke. Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Zakamna XXI, Proc. of Research and Practical Conference]. Ulan-Ude, VSGTU Publ., 2002b, pp. 122–131 (in Russian).
  25. Khodanovich, P.Yu., Smirnova, O.K., Yatsenko, R.I. *Ekologicheskie problemy osvoeniya sulfidosoderzhashchikh vol'framovykh mestorozhdenii v usloviyakh taezhno-merzlotnykh landshaftov raschlenennogo srednegoriya* [Environmental problems in the development of tungsten sulfide deposits in the permafrost taiga landscapes of the dissected upland]. *Gornyi informatsionnyi-analiticheskii byulleten'*, 2002a, no. 12, pp. 52–59 (in Russian).
  26. Yurgenson, G.A., Smirnova, O.K., Merkulov, E.B. *Sovremennoe mineraloobrazovanie v prirodno-tekhnogennoi sisteme Barun-Narinskogo khрани-lishcha otkhodov obogatitel'nogo proizvodstva Dzhidinskogo vol'framo-molibdenovogo kombinata* [Recent mineral formation in the natural-technogenic system of the Barun-Naryn waste dump, concentrating works of the Dzhida tungsten–molybdenum plant]. *Materialy II Vserossiiskogo simpoziuma "Mineralogiya i geokhimiya landshafta gornorudnykh territorii" i VIII Vserossiiskikh chtenii pamyati akademika A.E. Fersmana "Sovremennoe mineraloobrazovanie"* [Proceedings of II All-Russian Symposium on the mineralogy and geochemistry of mining landscapes and VIII All-Russian Readings in memory of A.E. Fersman on recent mineral formation], Chita, 2006, pp. 138–143 (in Russian).
  27. Candeis, C., Ferreira, Da Silva E., Salgueiro, A.R., Pereira, H.G., Reis, A.P., Patinha, C., Matos, J.X., Avila, P.H. Assessment of soil contamination by potentially toxic elements in the Aljustrel mining area in order to implement soil reclamation strategies. *Land degradation & Development*, 2011, vol. 22, p. 564–585.
  28. Garcia-Sanchez, A., Alonso-Rojo, P., Santos-Frances, F. Distribution and mobility of arsenic in soils of a mining area (Western Spain). *Science of the Total Environment*, 2010, vol. 408, pp. 4194–4201.
  29. Gedgafova, F., Uligova, T.S. Heavy metals in natural and technogenic ecosystems of the Central Caucasus. *Russian J. of Ecology*, 2007, vol. 38, no. 4, p. 295–298.
  30. Kabata-Pendias, A. *Trace Elements in Soils and Plants*, Fourth Edition. CRC Press, 2011. 548 p.
  31. Lizarraga-Mendiola, L., Gonzalez-Sandoval, M.R., Duran-Dominguez, M.C., Marquez-Herrera, C.

- Geochemical behavior of heavy metals in Zn-Pb-Cu mining area in the State of Mexico (Central Mexico). *Environ Monit Assess.*, 2009, vol. 155, pp. 355–372.
32. Loredó, J., Ordoñez, A., Álvarez, R. Environmental impact of toxic metals and metalloids from the Munon Cimero mercury-mining area (Asturias, Spain). *Journal of Hazardous Materials*, 2006, vol. A136, pp. 455–467.
33. Milu, V., Lerroy, J.L., Peiffert, C. Water contamination downstream from a copper mine in the Apuseni Mountains, Romania. *Environmental Geology*, 2002, vol. 42, pp. 773–782.
34. Rey J., Martínez J., Hidalgo M.C., Rojas D. Heavy metal pollution in the Quaternary Garza basin: A multidisciplinary study of the environmental risks posed by mining (Linares, southern Spain). *Catena*, 2013, vol. 110, pp. 234–242.
35. Serbula, S.M., Miljkovic, D.Dj., Kovacevic, R.M., Ilic A.A. Assessment of airborne heavy metals pollution using plant parts and topsoil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012, vol. 76, pp. 209–214.
36. Timofeev, I.V., Kosheleva, N.E., Kasimov, N.S., Gunin, P.D., Enkh-Amgalan, S. Geochemical transformation of soil cover in copper–molybdenum mining areas (Erdenet, Mongolia). *J. Soils Sediments*, 2015. doi: 10.1007/s11368–015–1126–2
37. Vodyanitskii, Yu.N., Savichev, A.T., Trofimov, S.Ya., Shishkonakova, E.A. Accumulation of Heavy Metals in Oil Contaminated Peat Soils. *Eurasian Soil Science*, 2012, vol. 45, no. 10, pp. 977–982.

## GEOCHEMISTRY OF SOIL COVER IN ORE MINING LANDSCAPE (ZAKAMENSK, TRANSBAIKALIA)

N. E. Kosheleva, N. S. Kasimov, I. V. Timofeev

*Geography Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, Moscow, 119991 Russia.  
E-mail: natalka@mail.ru; secretary@geogr.msu.ru; vano-timofeev@yandex.ru*

The aim of this paper is to assess geochemical changes in the soil cover in Zakamensk city (Russia, Buryatia Republic), where tungsten and molybdenum ores were exploited in 1934–2001. The study included: 1) determination of heavy metals and metalloids (HMMs) concentrations in the background soils developed on different parental rocks, and revealing priority pollutants in different types of land use; 2) identification of elements' associations and patterns of their spatial distribution in the soil cover; 3) assessment of technogenic geochemical transformation of urban soils. The soil-geochemical survey was conducted by the authors in summer 2012. The soils were sampled from the surface (0–10 cm) horizon according to a grid with a step of 450–650 m. The bulk content of HMMs in soil samples were analyzed by ICP-MS. Data on 17 priority pollutants belonging to I (Zn, As, Pb, Cd), II (Cr, Co, Ni, Cu, Mo, Sb), III (V, Sr, Ba, W) hazard classes, as well as on Sn, Cs, Bi were used for the detailed analysis. Chalcophylic elements (W, Bi, Cd, Pb and Mo) appeared to be the priority pollutants nearly in all functional zones ( $EF_i = 1.5–91$ ). Two stable multielement associations are distinguished in the Zakamensk urban soils (Cs–W–Bi–Cu–Zn–Cd–Sn and As–Sb–Pb–Mo) with the common accumulation zone in the center of city. It includes the emergency tailing, which was reclaimed in 2011; as well as Barun-Narinskoe and Zun-Narinskoe tailings. Environmental assessment of surface horizons in Zakamensk showed that 2/3 of its area shows dangerous and extremely dangerous levels of soil pollution. The anthropogenic factor, found from the assigning land use zones, appears to exert the greatest effect on the spatial patterns of HMMs distribution. Distribution of Co, V, Cr, Ni, Ba, Sr is controlled by the landscape and soil geochemical properties.

Our experience in and suggested methodology of ecological-geochemical assessment of surface soils can be used for other mineral deposits. We recommend using two indexes of cumulative impact of HMMs, i.e., index  $Z_c$  standing for the degree of geochemical transformation of soil cover due to anthropogenic factors, and the *IIR* risk index associated with multi-element pollution upon high background levels.

**Keywords:** *technogenic anomalies, ore-mining centers, heavy metals, technogenesis, environmental geochemistry.*