

# ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОГЕННЫХ ПОЧВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ ЮЖНОГО УРАЛА

## © Г.Т. Шафигуллина,

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт геологии,  
Уфимский научный центр РАН,  
ул. К. Маркса, 16/2,  
450000, г. Уфа, Российская Федерация,  
эл. почта: shafigullina\_g@mail.ru

## © В.Н. Удачин,

доктор геолого-минералогических наук,  
заведующий лабораторией,  
Институт минералогии,  
Уральское Отделение РАН,  
456317 г. Миасс, Ильменский заповедник,  
Российская Федерация,  
эл. почта: udachin@mineralogy.ru

## © К.А. Филиппова,

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт минералогии,  
Уральское Отделение РАН,  
456317 г. Миасс, Ильменский заповедник,  
Российская Федерация

## © П.Г. Аминов,

кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт минералогии,  
Уральское Отделение РАН,  
456317 г. Миасс, Ильменский заповедник,  
Российская Федерация

На примере Сибайской геотехнической системы со сформированными природно-техногенными ландшафтами приведены результаты оценки трансформации состава одного из объектов окружающей среды (почвенного покрова) при горнопромышленном техногенезе. В работе рассмотрены следующие аспекты: вертикальное распределение в почвенном профиле и потенциальные формы нахождения металлов.

При исследовании процессов геохимической трансформации почвенного покрова в условиях техногенеза селективным фазовым анализом определены потенциальные формы нахождения тяжелых металлов в почвах и выполнена оценка соответствия форм фиксации элементов с минеральным составом матрицы. Установлено, что в обменной форме сосредоточено 9% Cd и 12% Zn, являющихся потенциальными источниками загрязнения почвенного покрова из-за высокой активности обменных форм этих элементов.

Ключевые слова: геотехническая система, почвы, формы нахождения металлов, природно-техногенный ландшафт

© G.T. Shafigullina<sup>1</sup>, V.N. Udachin<sup>2</sup>, P.G. Aminov<sup>2</sup>,  
K.A. Filippova<sup>2</sup>

## GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF TECHNOGENIC SOILS IN THE MINING LANDSCAPES OF THE SOUTH URALS

<sup>1</sup>Institute of Geology, Ufa Scientific Centre,  
Russian Academy of Science,  
16/1, ulitsa Karla Marksa,  
450000, Ufa, Russian Federation,  
e-mail: shafigullina\_g@mail.ru

<sup>2</sup>Institute of Mineralogy,  
Ural Division of the Russian Academy of  
Sciences,  
456317, Miass, Ilmen Reserve, Russian  
Federation,  
e-mail: udachin@mineralogy.ru

Based on the Sibay geotechnical system with its well-developed natural and man-made landscapes, the paper describes the assessment results of compositional transformations in one of the environmental objects (soil cover) affected by mining technogenesis. Consideration is given to such aspects as vertical distribution in the soil profile and potential speciation of metals.

Using selective phase analysis to study the processes of geochemical transformations in the soil cover under technogenesis, we identified potential speciation of heavy metals in soils and assessed the compliance between elements and the mineral composition of the matrix. It has been found that 9% of Cd and 12% of Zn are concentrated in the exchange form and serve as a potential source of soil pollution due to highly active exchange forms of these elements.

Key words: geotechnical system, soil, speciation of metals, natural and man-made landscape

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-17-00691).

**Введение.** Рассеивание твердой фазы пылевых выбросов в направлении господствующих ветров приводит к формированию аномальных почв. Анализ почв Башкирского Зауралья на примере Учалинской геотехнической системы (ГТС), расположенной в северо-восточной части Республики Башкортостан, показал, что высокие концентрации металлов в почвах г. Учалы и прилегающей территории объясняются атмосферным поступлением тонкозернистых продуктов пылевой составляющей при технологическом процессе обогащения руд и при массовых взрывах на карьере [1; 2].

Похожие условия формирования техногенных аномалий, преимущественно халькофильных элементов в почвах, связанных с аэральным переносом тонкодисперсной взвеси, наблюдается в сформировавшейся Сибайской ГТС, расположенной в юго-восточной части

Башкортостана. В 1948 г. начал функционировать Башкирский медно-серный комбинат, что стало началом аэрального воздействия на экосистему. В связи с этим Сибайская ГТС является перспективной для изучения степени загрязненности тяжелыми металлами почв в зоне влияния комбината, отвалов вскрышных пород и хвостохранилищ. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют собой сульфидные фазы, которые, попадая в почву, при определенных рН-Eh-условиях могут окисляться. Окисление ведет к частичному высвобождению металлов из сульфидов и миграции их в составе почвенных растворов вниз по почвенному профилю.

В настоящее время проблема загрязнения почв тяжелыми металлами вследствие аэрального поступления сульфидной пыли является актуальной. Большое количество

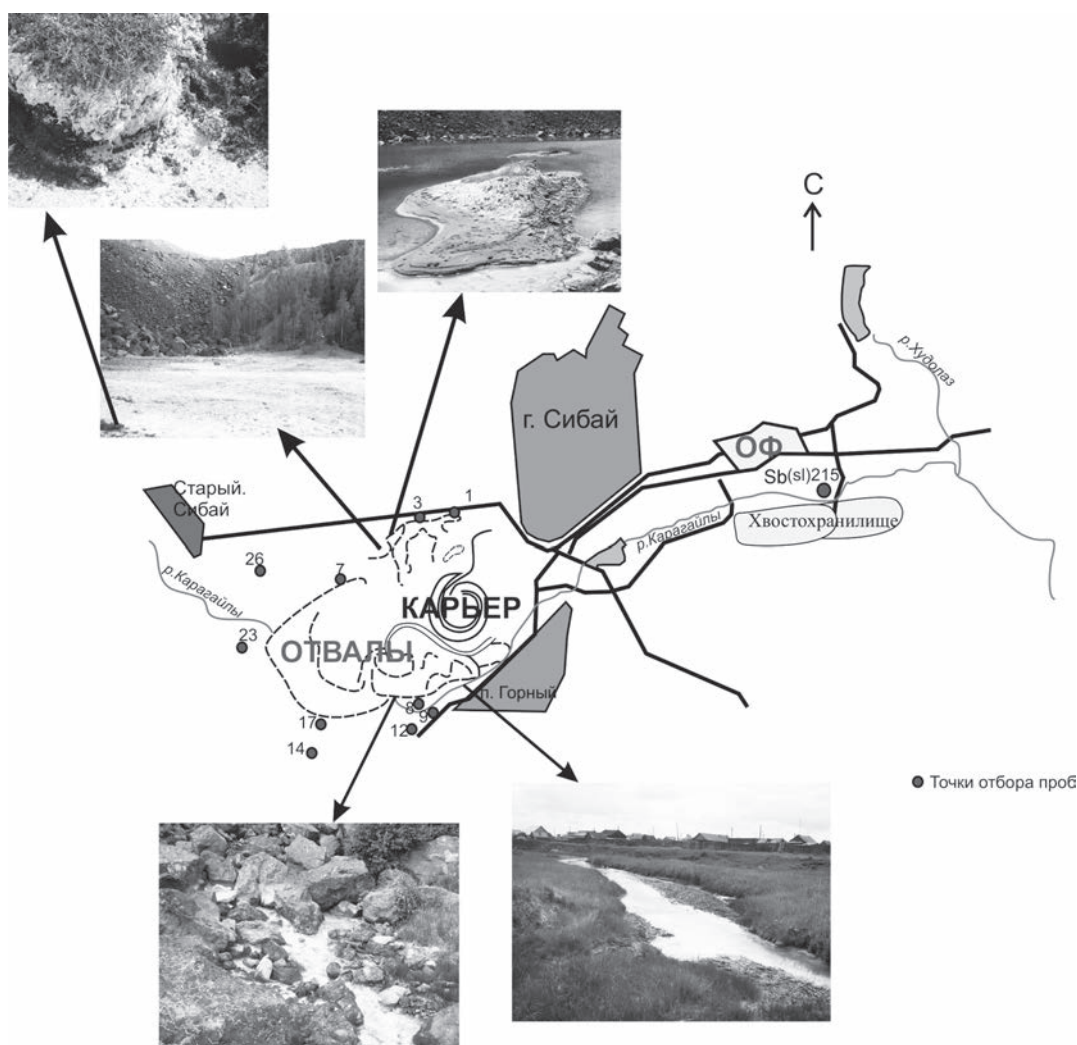


Рис. 1. Схема расположения точек опробования почв в зоне Сибайской ГТС

публикаций, посвященных данной проблеме, свидетельствует о ее важности и необходимости изучения.

**Объекты и методы исследования.** В качестве объектов исследования были выбраны почвы территорий, прилегающих к отвалам и хвостохранилищам Сибайского месторождения, и в зоне влияния обогатительной фабрики комбината (см. рис. 1).

Для изучения распределения элементов (Cu, Zn, Pb и др.) изменения физико-химических показателей по почвенному профилю заложен разрез Sb(SI)215 на правом берегу р. Карагайлы в 1 км от труб обогатительной фабрики и в 300 м ниже дамбы хвостохранилища. Выбор точечного опробования только поверхностных горизонтов почв (0–5 см, *top-soil*) возле отвалов обусловлен тем, что данный интервал выступает основным депо тяжелых металлов [1]. Разрез R(SI)230, характеризующий почвы природных ландшафтов, расположен в 15 км к юго-западу от источника эмиссии.

Концентрации элементов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в пламенном варианте атомизации на приборе Perkin-Elmer 3110. Кислотное вскрытие проб почв выполняли в стеклоглеродных тиглях при нагревании смесью кислот HF+HCl+HNO<sub>3</sub> в соотношении 2:3:1. Деструкцию фторидных комплексов осуществляли выпариванием осадка «сухих» солей раствором концентрированной HNO<sub>3</sub>. Конечную аликвоту пробы объемом 50 мл приводили к 1 н раствору HNO<sub>3</sub>. При определении потенциальных форм нахождения тяжелых металлов в почвах использован метод селективных химических экстракций [3].

Анализы выполнены в Южно-Уральском центре коллективного пользования по исследованию минерального сырья Ин-

ститута минералогии УрО РАН (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.514536). Оптические исследования аншлифов выполнены на микроскопе BX51 (Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс).

**Результаты исследований и их обсуждение**

**Распределение тяжелых металлов.** Мощность почв почвенного разреза Sb(SI)215 (см. рис. 2) составляет 60 см. По морфологическому строению почвенного профиля выделены: горизонт с сульфатными выцветами (A<sub>s</sub>, 0–1.5 см), гумусово-аккумулятивный горизонт (A<sub>1</sub>, 1.5–6 см), бурый оторфованный горизонт (A<sub>pit</sub>, 6–30 см) и иллювиальный горизонт (B, 30–60 см). Значение pH в верхних, с сульфатными выцветами и гумусово-аккумулятивном горизонтах находится на уровне 3.5, что отвечает сильно закисленным почвам.

В верхней части почвенного профиля наблюдается интенсивное накопление сульфат-иона (концентрации в водной вытяжке 2570 мг/л), что объясняется аэральным техногенным поступлением сульфидной пыли с возможным последующим ее окислением. Количество SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в нижележащем гумусово-аккумулятивном горизонте составляет 270 мг/л, что в 9 раз ниже, чем в вышележащем горизонте. Относительно низкое содержание SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в данном горизонте связано, скорее всего, с отсутствием или слабой

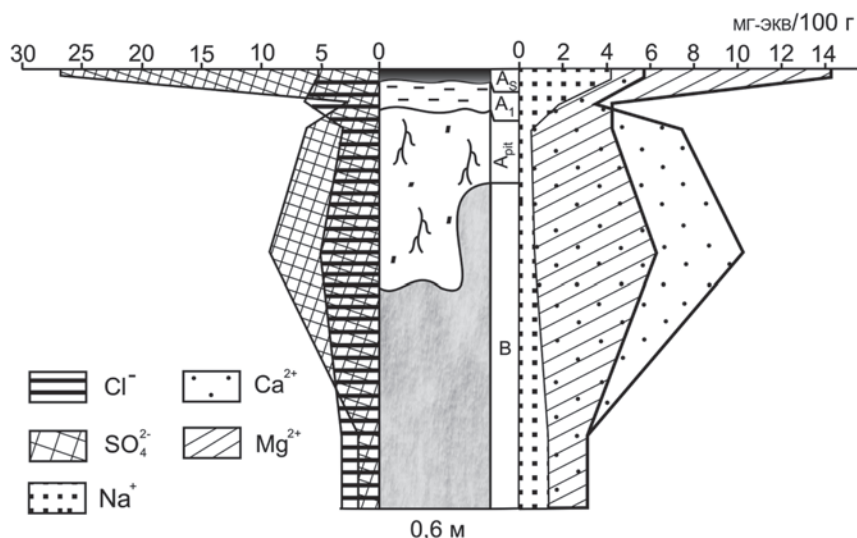


Рис. 2. Распределение Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup> (мг-экв/100 г) по почвенному профилю разреза Sb(SI)215

связью с органическим веществом. В ниже-лежащем буром оторфованном горизонте отмечается увеличение концентрации  $SO_4^{2-}$  до 590–900 мг/л, что может свидетельствовать о природных процессах избирательного накопления сульфат-иона торфоподобным материалом. Абсолютный минимум концентрации  $SO_4^{2-}$  (187 мг/л) наблюдается в иллювиальном горизонте В. Таким образом генетические горизонты почв под влиянием техногенеза проявляют различную сорбционную способность по отношению к сере. В количественном выражении распределение  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , а также обменных катионов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  (в мг-экв/100 г) приведено на рис. 2. Распределение концентраций  $SO_4^{2-}$  в генетических горизонтах почвенного профиля совпадает с распределением обменных катионов ( $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ ). Со-

держание обменных катионов изменяется в широких пределах. Они обладают свойством повышать значение рН, т.е. нейтрализовать кислотность. Высокое содержание в верхнем горизонте обменных катионов, оказывающих подщелачивающее действие, не полностью нейтрализует среду почвенного раствора, имеющего кислую реакцию. Это связано, вероятнее всего, с присутствием обменных  $H^+$  и  $Al^{3+}$ , являющихся основным фактором подкисления. Содержание  $Al^{3+}$  в верхних горизонтах в пределах 69–99 мг-экв/100 г.

Общей закономерностью распределения халькофильных элементов Cu, Zn, Pb, Cd и As (см. рис. 3) по почвенному профилю разреза Sb(SI)215 является их высокая концентрация в верхнем горизонте, являющимся горизонтом-коллектором пылевых аэраль-

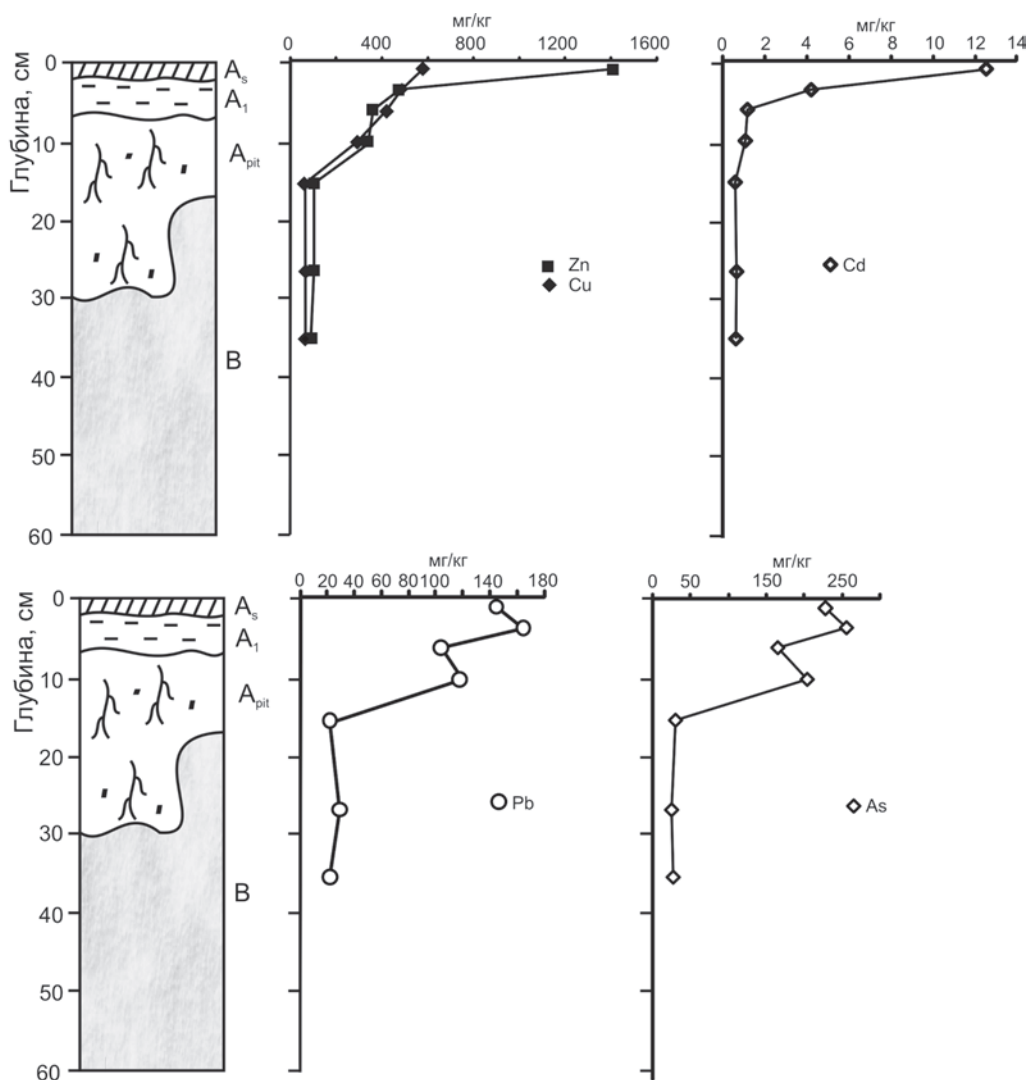


Рис. 3. Распределение Zn, Cu, Cd, Pb и As по почвенному профилю разреза Sb(SI)215

ных выпадений, и снижение концентраций в нижних частях разреза, что характерно для аэралью загрязненных почв с типичным аккумулятивно-техногенным типом накопления тяжелых металлов [4; 5]. Валовые содержания тяжелых металлов в верхнем горизонте почв составляют (мг/кг): Cu 583, Zn 1415, Pb 145, Cd 12.5, As 226, превышая значения ориентировочно допустимых концентраций (ОДК для кислых почв с pH < 5.5 [6]) до 10 раз. Но валовые содержания свидетельствуют лишь о потенциальной опасности накопленных тяжелых металлов.

Содержание Ni постепенно увеличивается по почвенному профилю от верхнего горизонта к нижнему иллювиальному горизонту В. Основными факторами вариаций количества Ni являются содержания глинистой фракции и величина pH, обуславливающие процессы сорбции и десорбции Ni в почвах [6]. Сорбционная способность верхнего с сульфатными выцветами и гумусово-аккумулятивного горизонтов со значениями pH 3,36–3,42 по отношению к Ni понижена. Подобное увеличение содержаний элементов вниз по профилю наблюдается и для Co, Cr, Mn, Zr, Y, Sc, Nb, Cs, Be, Li.

Для получения более объективной информации о загрязнении почвенного покрова рассчитан фактор обогащения (EF) для Cu, Zn, Cd, нормированный на Sc [7] (см. рис. 4):

$$EF = \frac{C_i(\text{проба})/C_{Sc}(\text{проба})}{C_i(\text{кларк})/C_{Sc}(\text{кларк})}$$

Почвы, находящиеся под влиянием техногенеза, обогащены Cu, Zn, Cd, As и другими элементами в 10 и более раз выше, нежели фоновые региональные почвы. Математическая обработка результатов включала также расчет суммарного показателя загрязнения (Zc) и коэффициента концентрации (kk). Значение Zc в районе обогатительной фабрики превышает 32 (Zc=57), и почвы по загрязненности относятся к 4-й и 5-й группам загрязненных почв. Накопление техногенных Cd, Zn, As, Pb и Cu в верхних горизонтах аэралью загрязненных почв отвечает коэффициентам концентрации 22, 11, 10, 7 и 6 соответственно.

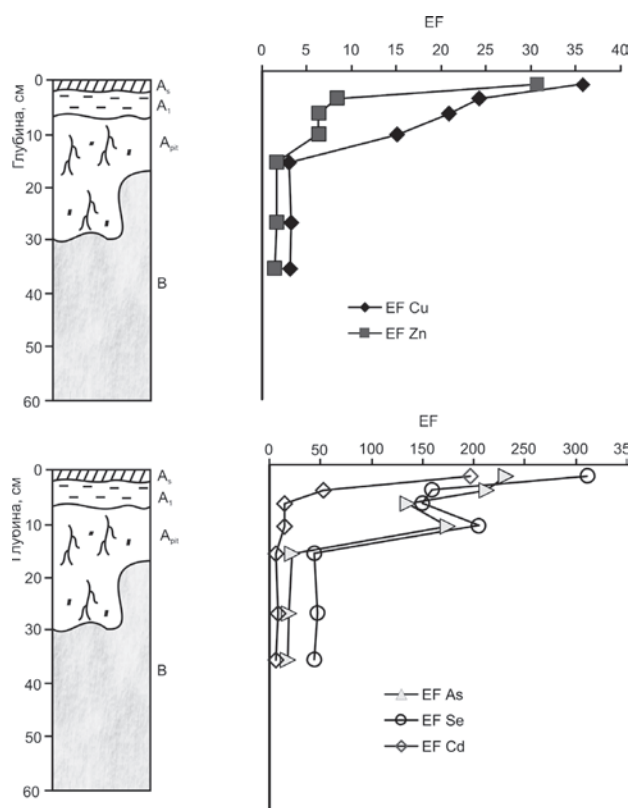


Рис. 4. Распределение EFCu, EFZn, EFAs, EFSe и EFCd по почвенному профилю разреза Sb(SI)215

Среди потенциальных экотоксикантов наибольшую опасность для окружающей среды представляет ртуть. Изучению ртутного загрязнения ландшафтов Башкирского Зауралья посвящены работы А.Н. Кутляхметова [8] и Л.Н. Белан [9]. Присутствие ртути в медноколчеданных рудах Южного Урала и в продуктах переработки руд (в сплошных рудах Сибайского месторождения среднее содержание Hg – 11.2 г/т [9]) обуславливает в дальнейшем аэралью поступление этого элемента в окружающую среду в значительных концентрациях.

Результаты исследования проб почв по горизонтам показали наличие концентрации ртути в почвах в значениях, не превышающих ПДК (2 100 нг/г). Концентрация ртути в верхнем горизонте с сульфатными выцветами составляет 1 090 нг/г, далее в гумусово-аккумулятивном горизонте незначительно увеличивается до 1 210 нг/г, а нижней части почвенного профиля в интервале 40–60 см характерно низкое ее содержание (279 нг/г), что соответствует фоновым концентрациям.

Иной характер распределения перечисленных элементов наблюдается в фоновых региональных почвах. Для них характерны развитие гумусово-аккумулятивного горизонта (А1) мощностью от 0 до 30 см, значения рН, близкие к нейтральным для водной вытяжки, низкие содержания элементов халькофильной группы (Cu, Zn и Pb) и сульфат-иона.

Поступление тяжелых металлов и их накопление в почвах связано не только с аэральными выпадениями сульфидного материала из труб обогатительной фабрики и эоловым разносом сульфидно-силикатного вещества от отвалов и хвостохранилищ, но и их гидротехногенным поступлением из отвалов и отходов обогащения в результате подтопления участка подотвальными техногенными водами [10]. Состав подотвальных вод зависит от процессов окисления кислотопродуцирующих минералов (сульфидов) и от буферизирующих факторов среды [1].

Литологический состав отвалов Сибайского месторождения характеризуется породами основного и кислого составов, с буферизирующими кислотность Са-Mg-содержащими минеральными фазами (кальцит, доломит, сидерит, хлорит и эпидот), которые могут влиять на изменение количества продуцируе-

мой кислотности и экстракцию металлов из пород, содержащих сульфидную минерализацию. Помимо рН-буферизирующих фаз, основными кислотопродуцирующими фазами являются сульфиды (пирит, халькопирит).

Техногенное сульфатное загрязнение верхних горизонтов почв выражено визуально (см. рис. 1). В течение засушливого сезона на поверхности почв вблизи отвалов формируются легкорастворимые сульфатные корочки и выцветы. Анализ полученных данных показал, что в почвах с сульфатными выцветами в зоне подтопления (пробы 3, 7, 8, 9; рис. 1) содержание основных тяжелых металлов в несколько раз выше, чем в почвах, не подвергшихся подтоплению. Данные подтвердили, что приоритетными загрязнителями почв в районе отвалов являются Cu и Zn, превышающие фоновые значения и ОДК в десятки раз. Также наблюдаются повышенные содержания никеля, кобальта и мышьяка в почвах, прилегающих к отвалам в зоне подтопления.

Таким образом, почвы с легкорастворимыми сульфатными новообразованными на испарительном барьере минералами, обладающие высокой степенью сорбции тяжелых металлов, представляют потенциальную

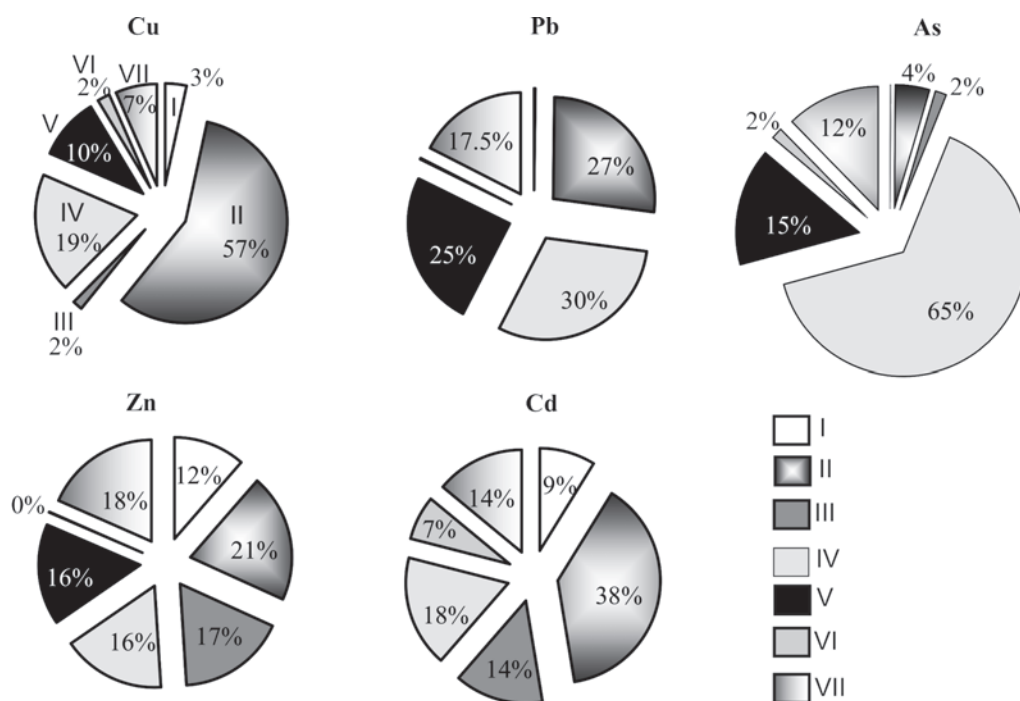


Рис. 5. Формы нахождения Cu, Zn, Pb, Cd и As в верхних горизонтах почв Сибайской ГТС: I – обменная; II – карбонатная; III – связанная с оксидами Mn; IV – связанная аморфными оксидами Fe; V – связанная с кристаллическими оксидами Fe; VI – органическая; VII – прочносвязанная

опасность загрязнения водных систем (р. Карагайлы и р. Худолаз) при минимальном изменении физико-климатических условий.

**Формы нахождения.** На рис. 5 показаны результаты селективных экстракций для Cu, Zn, Pb, As и Cd. По сравнению с Pb и As, где в обменных формах они практически не обнаружены, количество Cu в этой форме не превышает 3%, а доли Cd и Zn соответственно составляют 9% и 12% валовых содержаний. Большая часть Cu (57%), а также Cd (38%), Pb (27%) и Zn (21%), связана с карбонатной фракцией, что является характерным признаком карбонатных черноземов данного района. Кристаллические оксиды Fe связывают меньшее количество металлов, чем аморфные гидроксиды Fe. Ряд тяжелых металлов, связанных с аморфными соединениям Fe, выглядит следующим образом:  $As > Pb > Cu > Cd > Cu$ . Известно, что (гидр)оксиды железа – основные сорбенты мышьяка. Это определяет его меньшую подвижность и биодоступность, которая увеличивается лишь в кислых условиях [11–13]. В техногенных почвах механизм аккумуляции Cu, Zn оксидами Fe и Mn связан, в основном, с сорбционными процессами [14]. С органическими формами связана незначительная часть Cu, Cd и As (2–7%), а Zn и Pb в этой форме практически отсутствуют. Доля элементов в труднорастворимых «остаточных» формах выглядит следующим образом:  $Zn (18\%) > Pb (17.5\%) > Cd (14\%) > As (12\%) > Cu (7\%)$ .

Из рис. 5 видно, что основной объем элементов приходится на карбонатную форму и форму, связанную с аморфными гидроксидами Fe. Наибольшая доля обменных форм отмечается для Zn, Cd, а наименьшая – для Cu и располагаются в следующем убывающем порядке:  $Zn > Cd > Cu$ .

Соединения элементов, связанные с обменной, а также карбонатной формами, являются мобильными и потенциально биодоступными. Именно эти формы при определенных условиях могут переходить в почвенный раствор и мигрировать в составе внутрипочвенного и подземного стока, формируя широкие ареалы загрязнения в ландшафтах.

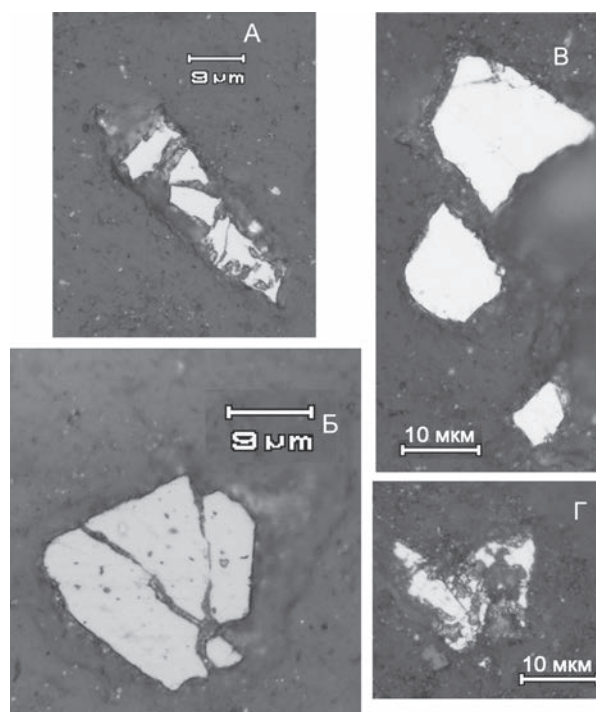


Рис. 6. Фрагменты зерен пирита (А, Б, В) и халькопирита (Г) в верхних горизонтах аэраально загрязненных почв Сибайской ГТС

Наиболее крупная техногенная пыль аэраальных выбросов обогатительного комбината выпадает вблизи источника эмиссии, где тяжелые металлы находятся в малоподвижном состоянии. По мере незначительного удаления от источника загрязнения (более 1 км) на поверхность почвы оседают тонкодисперсные частицы сульфидов, характерные для сульфидных концентратов обогатительной фабрики комбината (разрез Sb(SI)215), в которых металлы имеют высокую степень подвижности в почве.

Оптические исследования аншлифов показали, что сульфиды в почвах верхнего горизонта разреза Sb(SI)215 представлены пиритом, халькопиритом и сфалеритом разнообразных форм с размером зерен от 15 мкм до 90 мкм (рис. 6).

**Выводы.** Изучение распределения валовых содержаний тяжелых металлов по вертикальному профилю почвенного разреза показало резкое падение абсолютных концентраций Cu, Zn и Cd с глубиной, что подтверждает техногенно-аккумулятивный тип накопления и техногенную природу выявленных аномалий. Ряд с наиболее высокими коэффициентами концентрации в почвах имеют  $Cd > Zn > As > Pb > Cu$ .

В почвах, подверженных техногенному влиянию, наблюдается закисление (значение рН понижено на 2–4 единицы) по сравнению с фоновыми региональными разрезами, расположенными на удалении от источников эмиссии. Все это определяет низкую буферность этих почв и потенциально слабую комплексобразующую способность отдельных фракций почв для связывания, поступающих с аэральным потоком частиц тяжелых металлов.

По данным селективного фазового химического анализа установлено, что максималь-

ной долей обменных форм (подвижных, «экологически» опасных, усваиваемых растительностью) в почвах характеризуются Zn и Cd. Отмечена тенденция накопления элементов в карбонатной фракции, что характерно главным образом для карбонатных черноземов данного района. Несмотря на то, что элементы образуют прочные комплексы с аморфными оксидами Fe, даже незначительная доля (1/10 часть от валовых содержаний) обменных, биологически доступных форм Zn и Cd свидетельствует об экологической опасности этих металлов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шафигуллина Г.Т., Серавкин И.Б., Удачин В.Н. Экология Учалинской геотехнической системы. Уфа: Гилем, 2009. 236 с.

2. Шафигуллина Г.Т., Удачин В.Н., Филиппова К.А. Геохимия тяжелых металлов в техногенных почвах Учалинской и Сибайской геотехнических систем (Южный Урал) // Материалы V Всероссийской молодежной научно-практической конференции (с участием иностранных ученых). Проблемы недропользования. 8–11 февраля 2011 г. Екатеринбург. 2011. С. 372–379.

3. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Analytical chemistry, vol. 51. 1979. no. 7, pp. 844–851.

4. Елпатьяевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М.: Наука, 1993. 253 с.

5. Удачин В.Н., Аминов П.Г., Филиппова К.А. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2014. 252 с.

6. Овчаренко М.М. Тяжелые металлы в системе почва-растение-удобрение. М.: Пролетарский светоч, 1997. 290 с.

7. Taylor S. R. and McLennan S. M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1985. 312 p.

8. Кутляхметов А.Н. Ртутное загрязнение ландшафтов горнорудными предприятиями Башкирского Зауралья // автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Свердловск, 2002. 25 с.

9. Белан Л.Н. Промышленное загрязнение ртутью в горнодобывающих районах Республики Башкортостан // Вестн. Оренб. гос. ун-та. Т. 2. 2005. № 10. С. 90–94.

10. Савосько В.Н. Гидротехногенное накопление подвижных форм тяжелых металлов в почвах Кривбасца // Грунтознавство. Т. 4. 2003. № 1–2. С. 105–109.

11. Violante A., Pigna M. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils // Soil Sci. Soc. Am. J. Vol. 66. 2002, pp. 1788–1796.

12. Водяницкий Ю.Н. Изучение тяжелых металлов в почвах. М.: ГНУ Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАСХН, 2005. 109 с.

13. Водяницкий Ю.Н. Сродство тяжелых металлов и металлоидов к фазам-носителям в почвах // Агрохимия. 2008. № 9. С. 87–94.

14. Переломов Л.В., Пинский Д.Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2003. № 6. С. 682–691.

## REFERENCES

1. Shafigullina G.T., Seravkin I.B., Udachin N.N. Ekologiya Uchalinskoy geotekhnicheskoy sistemy [Ecology of the Uchaly geotechnical system]. Ufa, Gilem, 2009. 236 p. (In Russian).

2. Shafigullina G.T., Udachin V.N., Filippova K.A. Geokhimiya tyazhelykh metallov v tekhnogennykh poch-

vakh Uchalinskoy i Sibayskoy geotekhnicheskikh sistem (Yuzhnyy Ural) [The geochemistry of heavy metals in technogenic soils of the Uchaly and Sibay geotechnical systems (South Urals)]. Materialy V Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s uchastiem inostrannykh uchenykh). Problemy nedropolzovaniya – Proceedings of the 5th All-Russian Conference of Young Scientists (with foreign participants). Issues of



Mineral Resource Management. Ekaterinburg, 2011, pp. 372–379. (In Russian).

3. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical chemistry*, 1979, vol. 51, no 7, pp. 844–851.

4. Elpatyevskiy P.V. Geokhimiya migratsionnykh potokov v prirodnykh i prirodno-tekhnogennykh geosistemakh [Geochemistry of migration flows in natural and natural-anthropogenic geosystems]. Moscow, Nauka, 1993. 253 p. (In Russian).

5. Udachin V.N., Aminov P.G., Filippova K.A. Ekogeokhimiya gornopromyshlennogo tekhnogeneza Yuzhnogo Urala [Ecogegeochemistry of mining technogenesis in the South Urals]. Yekaterinburg, RIO UrO RAN, 2014. 252 p. (In Russian).

6. Tyazhelye metally v sisteme pochva-rastenie-udobrenie [Heavy metals in the soil-plant-fertilizer system]. M.M. Ovcharenko (ed.). Moscow, Proletarskiy svetosh, 1997. 290 p. (In Russian).

7. Taylor S. R., McLennan S. M. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications. Oxford, 1985. 312 p.

8. Kutliakhmetov A.N. Rtutnoe zagryaznenie landshaftov gornorudnymi predpriyatiyami Bashkirskogo Zauralya [Mercury contamination of landscapes by mining enterprises of the Bashkir Trans-Urals]. PhD Thesis in Geology and Mineralogy. Sverdlovsk, 2002. 25 p. (In Russian).

9. Belan L.N. Promyshlennoe zagryaznenie rtutyu v gornodobyvayushchikh rayonakh Respubliki Bashkortostan [Industrial mercury pollution in the mining areas of the Republic of Bashkortostan]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta – Herald of the Orenburg State University*, 2005, vol. 2, no. 10, pp. 90–94 (In Russian).

10. Savosko V.N. Gidrotekhnogennoe nakoplenie podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh Krivbassa [Hydro-technogenic accumulation of mobile forms of heavy metals in soils of the Krivoy Rog Basin]. *Gruntoznavstvo – Soil Science*, 2003, vol. 4, no. 1–2, pp. 105–109 (In Russian).

11. Violante A., Pigna M. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, vol. 66, pp. 1788–1796.

12. Vodyanitskiy Yu.N. Izuchenie tyazhelykh metallov v pochvakh [The study of heavy metals in soils]. Moscow, Dokuchaev Soil Institute, 2005. 109 p. (In Russian).

13. Vodyanitskiy Yu.N. Srodstvo tyazhelykh metallov i metalloidov k fazam-nositelyam v pochvakh [The affinity of heavy metals and metalloids to the carrier phases in soils]. *Agrokhimiya – Agrichemistry*, 2008, no. 9, pp. 87–94 (In Russian).

14. Perelomov L.V., Pinsky D.L. Formy Mn, Pb i Zn v serykh lesnykh pochvakh Srednerusskoy vozvysheynosti [Forms of Mn, Pb and Zn in grey forest soils of the Mid-Russian Upland]. *Pochvovedenie – Soil Science*, 2003, no. 6, pp. 682–691 (In Russian).