ЛИТОСФЕРА, 2016, № 2, с. 91–106

УДК 550.424:553.462

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД И ТЕХНОЗЕМОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ЗОЛОТО-МОЛИБДЕНОВОГО РУДНИКА ДАВЕНДА В ВОСТОЧНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ

© 2016 г. Г. А. Юргенсон*, О. К. Смирнова, М. А. Солодухина*, Р. А. Филенко***

**Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН*
672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а
e-mail: yurgga@mail.ru
***Геологический институт СО РАН*
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а
e-mail:meta@gin.bscnet.ru

Поступила в редакцию 27.07.2015 г.
Принята к печати 28.01.2016 г.

Приведены новые данные о минеральном и химическом составе руд, вмещающих горных пород и техноземa хвостохранилища Давендинского золото-молибденового месторождения. Минеральный состав руд (%): кварц (до 96), молибденит (до 1, но в среднем 0.26), пирит (до 7), халькопирит (до 2), сфалерит (до 0.07), галенит (до 0.1), сульфосоли (до 0.02), висмутин (до 0.2), шеелит (до 0.02), вольфрамит (до 0.01), борнит (до 0.03), тетрадимит (до 0.001), эмплектит (редкие находки) и золото (до 1817 г/т). В зоне окисления развиты различные сульфаты, в том числе крупные (до 10 см) кристаллы гипса, халькантит, малахит, азурит, брошантит, молибдит, ферримолибдит. Содержания основных химических элементов в техноземах, слагающих хвостохранилище, выше их кларков. Исключение составляют цинк, иттрий и олово. Особенно велики коэффициенты концентрации для мышьяка, висмута и молибдена, что свидетельствует о несовершенстве применявшейся технологии обогащения руд. Показано распределение химических элементов в геотехногенной системе: продуктивный минеральный комплекс (руда + рудовмещающие породы)→ почва→технозем→растения. Выявлена доля подвижных форм нахождения Mo, Zn, Cu, Pb в техноземах. Определены кислотно-основные характеристики техноземов. Установлено, что наиболее важной из подвижных форм является ионообменная водо-кислоторастворимая, в существенно меньшей мере – элементо-органическая.

Ключевые слова: *золото-молибденовая руда, технозем, хвостохранилище, химический элемент, подвижная форма, коэффициент биологического поглощения, Давендинское месторождение, Восточное Забайкалье.*

ВВЕДЕНИЕ

На поверхности литосферы за многовековую историю горного производства накопилось огромное количество его отходов, существенно влияющих на геоэкологическую обстановку. Накопление отходов горного производства с образованием техногенных месторождений происходит в исторических горнопромышленных регионах не только России [4, 17], но и всего бывшего СССР. Так, по данным [22], в Восточном Казахстане накоплено 1.4 млрд т отвалов пустых пород. В реках, размывающих отходы горного производства, содержание меди, кадмия, цинка превышает установленные нормы ПДК [22]. Общие проблемы минералого-геохимических процессов в пределах исторических горно-промышленных районов на протяжении многих лет (2006–2014) находятся в центре внимания Всероссийских симпозиумов “Минералогия и геохимия ландшафтов горнорудных территорий” и периодически рассматриваются геологической общественностью [3, 14, 28, 32, 33]. Исследования поведения бериллия в зоне техногенеза, выполненные И.И. Куприяновой с соавторами [20, 37], показали, что в аридных условиях миграция его заторможена в отличие от гумидных. Сделан также вывод об ограниченности миграции бериллия в глинистых почвах, накапливающих его подвижные формы.

На Дальнем Востоке было установлено, что хвостохранилища оказывают существенное влияние на химический состав поверхностных и подземных вод, на состав атмосферы, на репродуктивную систему растений [15–17, 19, 22]. Моделирование процессов окисления сульфидов на хвостохранилищах Кавалеровского и Комсомольского оловорудных районов Приморского края установило их влияние на гидросферу [4, 16, 17, 26], это же происходит при переработке продуктов обогащения медно-никелевых руд. Л.Я. Агаповой с соавторами [1]

разработан технологический подход к переработке вольфрам-рений-содержащих отходов.

Только на территории Восточного Забайкалья (Забайкальский край) находится 79 хвостохранилищ обогатительных фабрик. К ним относятся хвосты обогащения и шлаки рудников Нерчинского горного округа, перерабатывавших руды многочисленных полиметаллических месторождений в XVIII–XIX вв., а также обогатительных фабрик горных предприятий, разрабатывавших в советское время месторождения золота, молибдена, вольфрама, олова, редких металлов, германия, флюорита, закрытых в 1992–1993 гг. Общая расчетная масса отвальных хвостов в Восточном Забайкалье достигает 220 млн т.

Проблема влияния концентраций и форм нахождения химических элементов в техноземах длительно хранящихся отходов горного производства на геохимическую составляющую геотехногенных ландшафтов актуальна в связи с тем, что они определяют направленность и интенсивность их миграции, а также формирование минеральных новообразований на геохимических барьерах [40]. Эти же факторы оказывают существенное влияние на формирование почв и растительных сообществ, заселяющих поверхность хвостохранилищ и способствующих уменьшению их ветровой эрозии, закреплению поверхности и почвообразованию. Кроме того, как показывает опыт, заселяющие их растения являются качественным кормом для домашних и диких животных, охотно пасущихся на них.

К числу длительно хранящихся, так называемых лежалых, хвостов относятся отходы обогащения золото-молибденовых руд Давендинского месторождения, известного с 1-й четверти XX в. и отрабатывавшегося с 1942 по 1992 г. Непосредственно само месторождение, бывший рудник и сопутствующий ему пос. Давенда расположены в Могочинском районе Забайкальского края в бассейне р. Шилка (рис. 1), в верхнем течении р. Желтуга, в месте слияния ее притока р. Давенда с р. Покойная. Геологоразведочные работы на месторождении велись с начала 1930-х гг. Первые поисковые работы на коренное золото в пределах Александровского-Давендинского рудного поля начаты в 1936 г. Б.А. Рухиным. С 1939 по 1941 г. добыча велась попутно с разведкой. С 1941 г. в пос. Давенда в связи с потребностями военного времени начинает функционировать Давендинское рудоуправление по добыче молибдена с попутным извлечением золота. В 1961–1965 гг. выполнены геологическая съемка и поиски масштаба 1 : 50 000 [40].

Отработка месторождения велась подземным способом с нисходящей системой магазинирования отбитой руды [40]. Годовая производительность рудника в последние годы его работы составляла 165 тыс. т. За время функционирования фабрики в районе пос. Давенда образовался целый комплекс объектов, сопровождающих горнодобывающее предприятие (отвалы, шахты, хвостохранилище). В настоящее время предприятие законсервировано. Расчетная масса хвостов обогащения составляет 3586 тыс. т. Они содержат в среднем 0.05 г/т золота и 0.04% молибдена. Непосредственно за пределами хвостохранилища в долине р. Давенда до 2012 г. производилась добыча россыпного золота гидравлическим способом. В 2012 г. начата подготовка к отработке Александровского месторождения золота на Восточном фланге рудного поля. В долине р. Давенда ниже хвостохранилища построена фабрика кучного выщелачивания золота из руд этого месторождения.

Согласно схеме физико-географического районирования, территория относится к Байкало-Джугджурской горно-таежной области, Восточно-Забайкальской горно-таежной провинции, Приамурскому низкогорному таежному округу [2]. Особенностью ее является принадлежность к горно-таежной зоне сплошной мерзлоты. Нижняя граница распространения многолетнемерзлых пород достигает глубины 80–120 м, верхняя – от 0.5 до 6 м. Среднегодовая температура воздуха составляет –5.4ºС. Среди рельефообразующих процессов преобладают речная эрозия, солифлюкция и плоскостной смыв.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу статьи положены результаты полевых исследований Давендинского месторождения и хвостохранилища в 2007 и 2012 гг. Часть образцов руд месторождения была любезно предоставлена В.И. Сизых одному из авторов. Общее число изученных образцов руд составило 130, из них 88 отобрано в 2007 и 2012 гг. Образцы руд и горных пород отобраны из отвалов и выходов жил в устьевых частях штолен и обнажений жил. Пробы техноземов отобраны из хвостохранилища в 13 пунктах стояния (см. рис. 1).

Пробы отбирались из трех областей хранения отходов, разделенных дамбами и различающихся по времени образования и по минеральному составу. Кроме того, в каждой области исследовался вертикальный разрез до глубины 1–2 м, верхний горизонт которого представлял техногенные пески, например двд1. Образцы из более глубоких горизонтов (двд1а, двд1б, двд1в) в тех же точках состояли из различно окрашенных слоев песков или алевритов, мощность которых варьировала.

Почвы отобраны с уступа склона, примыкающего к нему со стороны устьевых частей штолен и лесного массива. Технозем и почву отбирали и готовили к анализу в соответствии с [8]. Всего отобрано и проанализировано на токсичные (цинк, мышьяк, висмут, свинец, молибден, олово, сурьма) и другие химические элементы 45 проб технозема

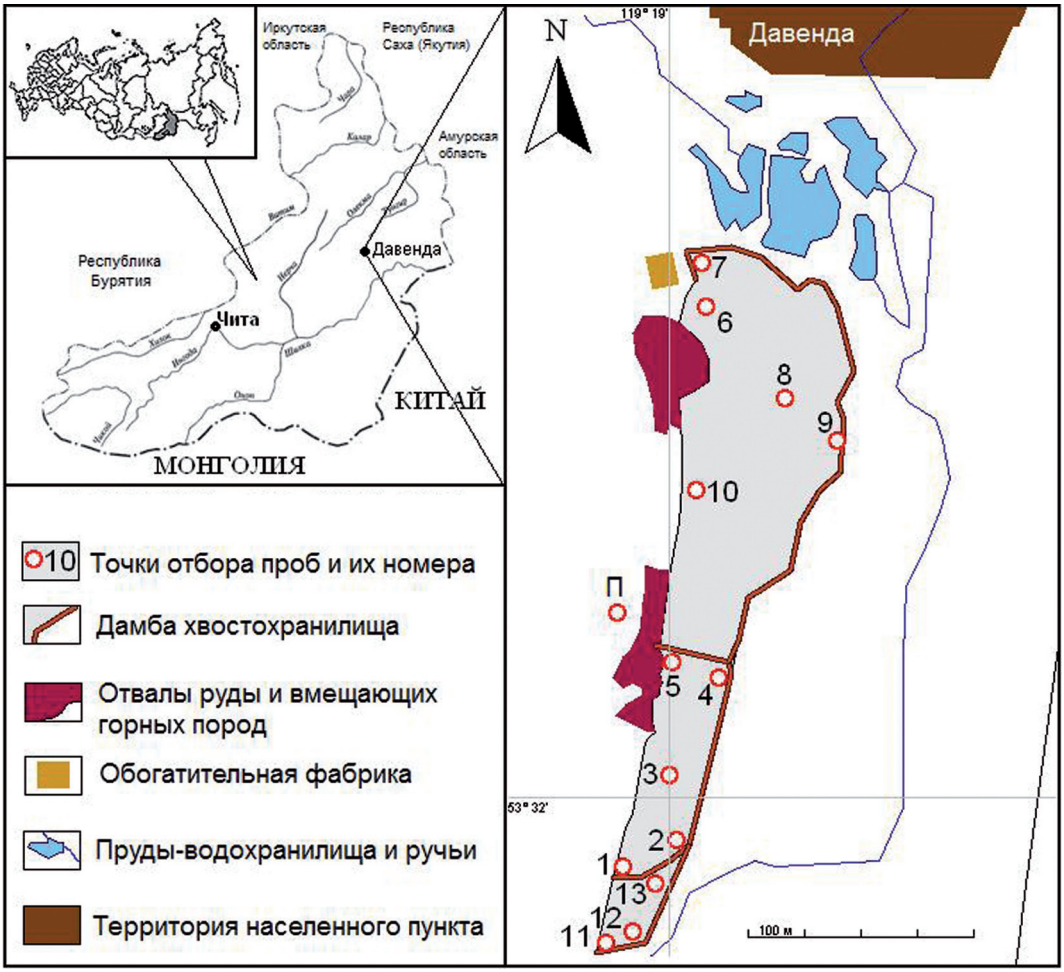

Рис. 1. Местоположение хвостохранилища рудника Давенда и точки отбора проб.

Fig. 1. Location of the mine tailings Davenda and sampling points.

с поверхности хвостохранилища, 14 проб из трех разрезов и 5 проб почвы.

Минералогический анализ руд выполнен с использованием шлифов и аншлифов, а также протолочных проб с помощью поляризационного микроскопа AXIOScope.A1 Zeiss и стандартных бинокуляров. Проведен классический количественный минералогический анализ, являющийся самым точным и наиболее чувствительным. Для анализа использовался 1 кг пробы, дробленой до класса 2.5 мм с последующим ее отмучиванием, разделением на классы крупности для гранулометрического и минералогического анализов. При необходимости производилось доизмельчение до класса 1.0 мм с подсевом. Подготовка к минералогическому анализу произведена фракционированием на магнитную (обычным магнитом Сочнева), легкую и тяжелую фракции в бромоформе и разделением тяжелой фракции на электоромагнитную и немагнитную на электромагните УЭМТ-1. Для определения содержания минерала, равного 0.001%, достаточно присутствия в 1 кг пробы 10 мг определяемого минерала, находящегося в тяжелой фракции. Под бинокуляром из тяжелой неэлектромагнитной фракции отбирается его монофракция и взвешивается на аналитических весах в процессе минералогического анализа. Диагностика минералов производилась с использованием люминесцентных насадок на бинокуляр, при необходимости сопровождалась съемкой рентгенограммы с использованием метода Дебая–Шерера, а для прозрачных минералов – иммерсионнным методом. Количество минерала в тонкой фракции (– 0. 74 мм, или 200 меш) определялось в аншлифах-брикетах под микроскопом в отраженном свете. Элементный анализ руд выполнен в лабораториях ЗабНИИ атомно-абсорбционным (Pb, Zn, Cu, As, Sb, Co, Ni и др.), рентгено-спектральным (Sr, Y, Zr) и пробирным (Au, Ag) методами (аналитики В.В. Васильева, Г.Н. Суркова, Г.Т. Тумуров), измерения на приборах ISP-OES,AAS, а также в АО SGS Восток Лимитед (г. Чита) методом ISPMS (зав. лабораторией Т.Л. Попова). Анализ химического

Таблица 1. Фракции, реагенты и условия экстракции

Table 1. Fractions, reagents and conditions for extraction

Методика	Фракция	Реагент (на 1 г. образца)	Время перемешивания и температура, стандартные методики
Модифицированная BCR методика	1. Ионообменная водо- и кислоторастворимая	40 мл 0.11M CH_3COOH	16 ч при 25ºC
	2. Оксиды и гидроксиды железа и марганца	40 мл 0.5M $NH_2OH{\cdot}HCl$, pH = 2, регулируется HNO_3	16 ч при 25ºC
	3. Органическое вещество и сульфиды	10 мл 8.8M H_2O_2	1 ч при 25ºC, 1 ч при 85ºC
		10 мл 8.8M H_2O_2	1 ч при 85ºC
		50 мл 1M CH_3COONH_4, pH = 2	16 ч при 25ºC
	4. Сульфиды	Царская водка	ГОСТ 2082.5–81
	5. Остаточная	HF, HNO_3, $HClO_4$	Инструкция №155-ХС

состава почв и технозема определен рентгеновским флуоресцентным анализом (РФА) в аналитической лаборатории ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) на спектрометре VRA-30 (Б.Ж. Жалсараев и Ж.Ш. Ринчинова). Определение подвижных форм и анализ проб методом селективной экстракции проводились в ГИН СО РАН (А.Е. Сарапулова). Для определения подвижных форм использовались пробы, высушенные и просеянные через сито с размером ячеек 1 мм. Образцы для селективной экстракции были высушены при 105ºC в воздушно-проточной печи и перетерты в агатовой ступке для гомогенизации. Определение валового содержания Cu, Zn, Pb, Ni в вытяжках проб из разрезов произведено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии [30] (AAS-1N). Содержания молибдена в вытяжках и его подвижные формы определялись фотоколориметрическим методом [12], затем пересчитывались в млн$^{-1}$ на вес сухого образца (предел обнаружения Mo – 0.012 мкг/мл).

Определение большого содержания Mo в пробах произведено методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии в пламени: ацетилен–закись азота. Подвижные формы Cu и Zn определены по ГОСТам [10–12]. Содержание мышьяка в вытяжках и фотоколориметрическое определение мышьяка в молибденовых концентратах производилось по [9], pH водной суспензии образцов установлен по методике [25].

В данной работе для получения вытяжек использовался метод селективной экстракции, разработанный Community Bureau of Reference [38] (табл. 1). Обработка царской водкой проводилась по [9], чтобы уловить остаточную фракцию мышьяка. Царская водка растворяет остатки сульфидов, которые не растворились в третьей фракции.

Вследствие трудности растворения образцов техногенного происхождения в методику добавлена пятая ступень, где для обработки нерастворимых осадков использовалась смесь кислот по инструкции [30].

Относительное стандартное отклонение результатов определения по методике последовательной экстракции составляет <10%. Так как запас точности $Z > 0.8$, результаты считаются удовлетворительными [23]. Систематическая погрешность не значима. Пределы обнаружения металлов по методике [30] составили соответственно (%): Cu – 0.0007, Zn – 0.0003, Pb – 0.002, Ni – 0.002, Mo – 0.005, Fe – 0.0014, Mn – 0.0007.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ, МИНЕРАЛЬНОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РУД

Месторождение изучалось А.В. Дружининым (1960 г.), М.Е. Рудницким (1961 г.), В.Л. Литвиновым и Ю.С. Соломиным (1964 г.), Ю.С. Соломиным (1965 г.), В.А Борисовым (1968 г.), В.И. Сотниковым (1977 г.) и другими авторами [27, 33]. Оно приурочено к Ивачевскому разлому, являющемуся фрагментом Давенда-Ключевской зоны разрывных нарушений. В сколовых оперяющих трещинах этого разлома локализованы жильные и штокверковые рудные тела месторождения [5, 13, 18, 21].

Рудное поле сложено биотит-роговообманковыми гранодиоритами и лейкократовыми аплитовидными гранитами амананского интрузивного комплекса (J_{2-3}), к которому относится Давендинский гранитный массив. Эти гранитоиды прорваны дайками амуджикано-сретенского комплекса (J_3), с которым связывается золото-молибденовое оруденение Давендинского месторождения [7]. Вмещающие горные породы представлены преимущественно кристаллическими сланцами и гнейсами архей-протерозойского возраста, а также метаморфизованными осадками позднепермской куйтунской свиты, прорванной гранитоидами рудовмещающего Давендинского массива. Rb-S изохрона гранитоидов амананского комплекса соответствует 186 ± 23 млн лет [7]. Месторождение относится к жильному типу молибден-кварцевой формации, являющейся переходной от медно-молибден-порфировой к золото-молибденит-кварцевой. Оруденение локализовано в жилах и жильных зонах протяженностью сотни метров.

Особенностью месторождения является интенсивное развитие калишпатизации, характерной для молибденового оруденения [29]. Она наблюдается непосредственно в приконтактовой части жил, обусловливая высокую калиевость руд и рудовмещающих горных пород и, как следствие, техноземов, слагающих хвостохранилище.

Жильные тела имеют протяженность по простиранию от 75–100 до 1500–1700 м и в глубину до 500 м. Мощность их варьирует в пределах 0.15–0.80 м. По простиранию и падению большинство жил не прослежено.

Минеральный состав руд довольно прост (%): кварц (до 96), молибденит (до 1, но в среднем 0.26), пирит (до 7), халькопирит (до 2), сфалерит (до 0.07), галенит (до 0.1), сульфосоли (до 0.02), висмутин (до 0.2), шеелит (до 0.02), вольфрамит (до 0.01), борнит (до 0.03), тетрадимит (до 0.001), эмплектит (редкие находки) и золото (до 1817 г/т). В золотоносных минеральных ассоциациях содержание висмутина, ассоциирующего с тетрадимитом и гуанохуатитом, достигает 1.0% [29]. Второстепенные жильные минералы представлены калиевым полевым шпатом, мусковитом и другими слоистыми силикатами (до 2–3%), турмалином (до 3–5%) и карбонатами. Зона окисления развита до глубины 100 м. Здесь развиты различные сульфаты, в том числе крупные (до 10 см) кристаллы гипса, халькантит, малахит, азурит, брошантит, молибдит, ферримолибдит и др. [33]. Окисленный молибден как в рудах, так и в хвостохранилище представлен в основном молибдитом и ферримолибдитом. Доля окисленного молибдена достигала в верхних частях месторождения 50% и более от общего его содержания. Доля окисленного молибдена в рудах отдельных жил в среднем составляла 9.73%.

Жилы имеют сложное строение, в них основная масса раннего крупнозернистого молочно-белого кварца содержит незначительное количество пирита, крупночешуйчатого молибденита и висмутина.

Пирит находится как в калишпатизированных граносиенитах, так и в приконтактовых частях жил между калиевым полевым шпатом и кварцем. Основная масса молибденита связана с более поздним мелко- среднекристаллическим светло-серым кварцем. Молибденит находится в тесном срастании с кварцем, образуя мелкочешуйчатые агрегаты, отчего кварц становится серовато-голубым.

Тонкочешуйчатый молибденит нередко цементирует обломки катаклазированного раннего крупнозернистого кварца либо находится на границах крупнозернистого молочно-белого и тонкозернистого кварца. При этом он ассоциирует с тонкочешуйчатым мусковитом в виде тонких (0.1–0.8 мм) изогнутых слоев существенно молибденитового состава либо образует с кварцем теснейшие срастания, что оказывало существенное влияние на его извлечение и уход в хвосты. Это четко прослеживается при сравнении содержаний молибдена и других элементов в хвостах обогащения. Такие полосчатые агрегаты рассекаются прожилками пирит-кварцевого состава. Вольфрамит связан с ранней генерацией кварца. Он образует мелкопластинчатые агрегаты в тесном срастании с кварцем, при обогащении частью увлекаясь в концентрат, частью в составе легкой фракции уходя в отвальные хвосты. Турмалин тесно ассоциирует с кварцем, нередко являясь цементом брекчий. Тонкоигольчатый турмалин насыщает, пронизывает кварц. В кварце находятся скопления пирита, халькопирита, шеелита, с которыми ассоциируют галенит, сфалерит, блеклая руда, висмутин, тетрадимит, эмплектит, золото. Золотом обогащены участки жил, где развиты минералы висмута и теллура (гуанохуатит, висмутин, эмплектит, тетрадимит), тяготеющие к северо-восточным верхним частям жил. Оно образует существенные концентрации на вертикальном интервале около 200 м. Это характерно для северо-восточной части жилы № 8/9. Содержание золота на ее верхних горизонтах (канава 108) находится в пределах 88.7–1817 г/т. Ниже по падению жилы у устьев штолен № 7 и 8 оно соответственно составляет 13.8 и 10 г/т, с глубиной уменьшаясь с 6.8 до 2.4 г/т [29].

Среднестатистические характеристики продуктивных минеральных комплексов представлены в табл. 2, из которой видно, что в них присутствует довольно широкий набор химических элементов, средние значения концентраций которых, за исключением ванадия, циркония, никеля и кобальта, кратно превышают кларки.

Среднее содержание в рудах главных и примесных элементов, по данным отработки месторождения, составило (%): Mo – 0.212, Cu – 0.382, Pb – 0.06, Zn – 0.036, Bi – 0.005 (максимум до 1%), W – 0.057, Au – 2.8 г/т и Ag – 1.6 г/т [6]. Средние содержания молибдена в отрабатывавшихся продуктивных жилах представлены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Источники, концентрации и формы нахождения элементов в горной массе, поступавшей на фабрику

Изучение руд и техноземов показало, что формы нахождения молибдена в них зависели от соотношения первичного и окисленного молибдена в руде. Как видно из табл. 4, содержание окисленного молибдена, находившегося в форме молибдита, ферримолибдита и, в меньшей мере, повеллита, за редким исключением не превышало 0.05%, а его доля – 10%.

Источниками химических элементов в добываемой горной массе, поступавшей на фабрику, были не только рудные жилы, но и вмещающие их

Таблица 2. Статистические параметры содержания химических элементов в руде

Table 2. Statistical parameters of chemical elements in the ore

Элемент	n	x, г/т	σ,	σ/x	Кларк	x/кларк
Ag	42	1.6	3	1.9	0.07	22.8
Au	24	2.8	3.2	1.2	0.0043	651.2
Cu	42	382	639	1.7	47	8.1
Bi	42	49	158	3.2	0.009	5444.4
As	21	118	85	0.7	1.7	69.4
Pb	40	59	88	1.5	16	3.7
Zn	42	362	1553	4.3	83	4.4
Co	42	11	8	0.7	18	0.6
Ni	42	22	17	0.8	58	0.4
Sb	42	10	12	1.2	0.5	20.0
Mo	42	2120	1758	0.8	1.1	1927.3
W	42	574	2142	3.7	1.3	441.5
Sn	42	24	78	3.2	2.5	9.6
V	42	28	27	1	90	0.3
Cr	42	248	539	2.2	83	3.0
Zr	21	50	54	1.1	170	0.3

Примечание. Здесь и в табл. 5: n – число проб в выборке, x – среднеарифметическое, σ – среднеквадратичное отклонение, σ/x – сотая доля коэффициента вариации.

Note. Here and in Table 5: n – the number of samples x – average, σ – standard deviation, σ/x – one hundredth of the coefficient of variation.

горные породы. По данным [21], тяжелая неэлектромагнитная фракция, содержавшая элементы-примеси в породах станового комплекса, находилась в пределах 50–850 г/т, а в породах амананского и амуджикано-сретенского – 50–1500 г/т. Источником фосфора являлся апатит, содержание которого составляло 4.6–11430 г/т. Апатит и сфен были также источниками редких земель. Носителями сфена являлись гибридные порфиры (1000–4544 г/т) и граниты амуджикано-сретенского комплекса (323–346 г/т). Цирконий и гафний поступали в добываемую горную массу в составе циркона большинства горных пород, содержавших его в количестве 0.5–245 г/т.

Дополнительным носителем ряда химических элементов в рудах, а также в почвах и техноземах был пирит околорудно-измененных пород. Содержание его в последних находилось преимущественно в пределах 13.5–1496 г/т при среднем для 14 проб 417.7 г/т и среднеквадратичном отклонении 707.4. Содержание элементов-примесей в пирите [31] дано в табл. 5.

С учетом относительно высоких содержаний пирита в рудах, продуктивных минеральных комплексах (до 7%) и вмещающих породах (417.7 г/т) вклад его в содержание элементов-примесей в почвах и техноземах достаточно велик. Как видно из табл. 5, он содержит (г/т): теллур – 5, мышьяк – 98, свинец – 30, цинк – 97, сурьму – 49 и другие элементы в токсичных концентрациях.

Таблица 3. Средние содержания молибдена в продуктивных рудных жилах и их минеральный состав*

Table 3. The average content of molybdenum ore in production veins and their mineral composition*

Рудное тело	Среднее содержание молибдена, %	Главные первичные минералы	Главные минералы зоны окисления
Жила №1	0.15	Молибденит, золото, пирит	Гидроксиды железа, ферримолибдит, мелантерит
Жила №2	0.37	Молибденит, золото, пирит, халькопирит	Гидроксиды железа, ферримолибдит, повелит, азурит, малахит, гипс
Жила №3	0.24	Молибденит, гематит, золото, пирит, халькопирит	Гидроксиды железа, ферримолибдит, молибдит, повелит, азурит, малахит, гипс
Жила №6/12	0.19	Молибденит, пирит, халькопирит магнетит, висмутин, сфалерит, галенит	Гидроксиды железа, ферримолибдит, молибдит, церуссит, англезит, бисмутит, смитсонит, ковеллин, куприт
Жила №8/9	0.38	Молибденит, пирит, станнин, шеелит, вольфрамит, сфалерит, халькопирит, золото	Гидроксиды железа, ферримолибдит, повелит, азурит, малахит, гипс, брошантит, смитсонит
Жила №11	0.22	Молибденит, пирит, халькопирит, сфалерит, блеклая руда, арсенопирит, галенит, станнин, золото, серебро	Гидроксиды железа, ферримолибдит, повелит, азурит, малахит, гипс, брошантит, скородит, церуссит, стибиконит, сенармонтит
Жила №16	0.33	Молибденит, пирит	Вскрыта подземными выработками
Жила №30	0.19 – 0.45	То же	Нет данных

* Составлено с использованием материалов рудника Давенда по разведке и отработке месторождения.

* Compiled using materials of the Davenda mine by prospecting and exploration of the deposit.

Таблица 4. Доля окисленного молибдена в рудах месторождения Давенда

Table 4. The proportion of oxidized molybdenum in the ore of Davenda deposits

Рудное тело	Среднее содержание Mo, %		Доля окисленного Mo, %
	Общее среднее	Окисленные формы	
Жила №2	0.31	0.04	12.90
Жила №3	0.24	0.05	20.83
Жила №4A	0.23	0.02	8.70
Жила №4B	0.19	0.04	21.05
Жила №5	0.67	0.02	2.99
Жила №6/12	0.19	0.01	5.26
Жила №8/9	0.38	0.08	21.05
Жила №8/9A	0.35	Н.о.	Н.о.
Жила №11	0.22	0.01	4.55
Жила №16	0.33	Н.о.	Н.о.
Среднее	0.31	0.03	9.73

Примечание. Н.о. – не обнаружено.

Note. H.o. – not detected.

Таблица 5. Статистические параметры содержания элементов-примесей в пирите основной генерации

Table 5. Statistical parameters of admixture elements in pyrite base generation

Элемент	n	x, г/т	σ	σ/x
Au	2	0.33		
Ag	7	0.8	0.6	0.7
	1	2.47*		
As	7	98	18	0.2
Bi	7	16	14	0.8
Co	7	69	49	0.7
Cu	7	107	66	0.6
Ni	7	8	6	0.7
Pb	7	30	14	0.5
Zn	7	97	1.0	7
Sb	7	49	9	0.2
Te	6	5	4	0.8

Примечание. Звездочкой обозначено необычно высокое содержание.

Note. An asterisk indicated unusually high content.

В рудах месторождения установлены рений и селен. Они, как известно, связаны с молибденитом, так как между их содержаниями установлена корреляция, а между количеством селена и теллура корреляции нет [29]. Теллур коррелирует с золотом и висмутом, что увязывается с присутствием золота в ассоциации с тетрадимитом [31].

В процессе обогащения руд на фабрике производительностью 500 т/сут основная масса рения, селена и теллура извлекалась в молибденитовый концентрат с содержанием молибдена 51%. Ежегодно производилось 250–300 т концентрата, который поступал в металлургический передел на Скопинский металлургический завод (Рязанская область). В почвах и техноземах эти элементы не обнаружены, так как их содержание ниже предела чувствительности использованных методов анализа, но в растениях установлен селен (см. ниже).

Сравнительное содержание элементов-примесей и их форм в системе руда→почва→технозем

Сравнение содержаний главных элементов в системе дано на рис. 2. Содержания их в почвах (табл. 6), за исключением цинка, свинца, сурьмы, бария, иттрия и церия, существенно больше кларковых (в 2–281.1 раз). Наиболее высокие коэффициенты концентрации типичны для мышьяка (17.6), висмута (80), ниобия (7.5) и молибдена (281.1). Это отражает общую геохимическую специализацию продуктивного минерального комплекса. Содержания сурьмы и мышьяка в 2 и более раз превышают ПДК (см. табл. 6). В связи с тем, что ПДК висмута, иттрия, ниобия, молибдена, цезия, бария, церия и ряда других элементов для почв и техноземов однозначно не установлены, содержания их оценены относительно кларков (см. табл. 6, 7).

Содержания основных химических элементов в техноземах, слагающих хвостохранилище, лишь для цинка, иттрия и олова ниже кларков. Особенно велики коэффициенты концентрации для мышьяка, висмута и молибдена, что свидетельствует о несовершенстве применявшейся технологии обогащения руд. На основе полученных данных построены графики сравнения содержания главных компонентов в руде, почве и техноземе (см. рис. 2).

Содержания всех элементов, кроме циркония и сурьмы, максимальны в рудах. Возрастание содержаний циркония и сурьмы в техноземах обусловлено тем, что они практически не флотируются в режиме флотации молибденита.

Содержания висмута, мышьяка, свинца снижаются в рассматриваемом ряду, что вполне закономерно. В почвах накапливаются цинк, молибден и олово. Относительное накопление цинка обусловлено тем, что он частично присутствует в водо- и кислоторастворимых формах примерно в половине изученных проб [27]. Доля этой формы цинка составляет в среднем 21.62%. В 55% проб до 10–15% цинка связано с органическим веществом, входящем в состав почв (рис. 3а).

Относительное накопление молибдена в почвах связано с тем, что основная его масса находится в элементоорганической и сульфидной формах. В почвах накапливается также тонкочешуйчатый молибденит, задерживающийся в верхних ее горизонтах. Существенное значение для ухода части молибдена в отвал имело рассеянное состояние тонких его чешуй в кварце, не извлекавшихся

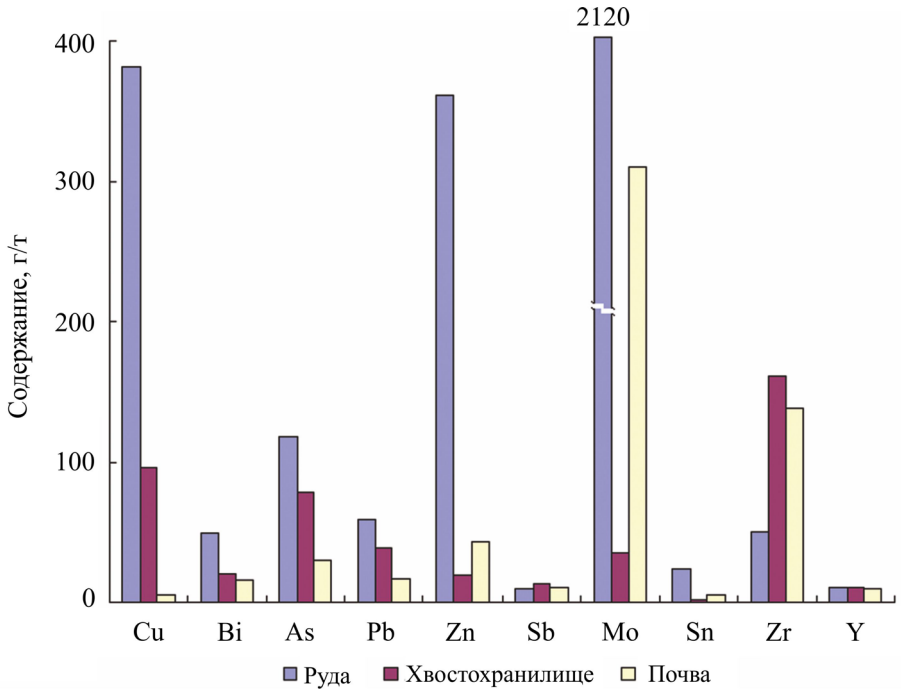

Рис. 2. Сравнение содержаний главных химических элементов в рудах, почвах и хвостохранилище.

Fig. 2. Comparison of key chemical elements in the ores, soils, and tailings pond.

Таблица 6. Статистические характеристики содержания химических элементов в почве по 5 пробам

Table 6. Statistical characteristics of chemical elements in the 5 soil samples

Элемент	x, г/т	σ	min	max	ПДК	x/ПДК	x/кларк
Zn	44	32	5	93	23	1.91	0.53
Cu	121	48	16	217	100/3*	1.2/40	2.55
As	30	8	19	39	2	15	17.6
Bi	16	25	5	61	–	–	80
Pb	17	12	5	33	32/6.0*	0.6/2.8	1.06
Y	10	6	1	17	–	–	0.34
Nb	15	9	8	25	–	–	7.5
Mo	310	306	70	650	–	–	281.1
Sn	5	5	1	14	–	–	2
Sb	11	4	7	14	4.5	2.4	1
Cs	13	7	2	19	–	–	3.25
Ba	829	202	694	1187	–	–	1.76
Ce	57	11	40	67	–	–	1.32

Примечание. Звездочкой обозначены ПДК из “Перечня …” [24] : 32 мг/кг – общесанитарный с учетом фона, 6.0 мг/кг – общесанитарный для подвижной формы, извлекаемой из почвы ацетатно-аммонийным буферным раствором pH 4.8 для свинца и соответственно (мг/кг) 100 и 3 для меди.

Note. Asterisk denoted maximum allowable concentration (ПДК) from “Перечень...” [24]: 32 mg/kg considering general sanitary background, 6.0 mg/kg – general sanitary for movable mold extracted from soil by ammonium acetate buffer pH 4.8 for lead, and respectively (mg/kg) 100/3 for copper.

Таблица 7. Статистические характеристики содержания химических элементов в хвостохранилище по 45 пробам

Table 7. Statistical characteristics of chemical elements in the tailing pond on 45 samples

Элемент	x, г/т	σ	min	max	ПДК	x/ПДК	x/кларк
Zn	19	44	5	270	23	0.83	0.22
Cu	96	43	36	172	100/3	0.96	2.04
As	79	66	18	450	2	39.5	46.5
Bi	21	38	5	190	–	–	105
Pb	39	81	5	400	32	1.3	2.4
Y	11	3	5	21	–	–	0.37
Nb	7	3	3	23	–	–	3.5
Mo	35	100	3	670	–	–	31.8
Sn	2	1	1	3	–	–	0.8
Sb	13	5	5	39	4.5	2.9	2.6
Cs	16	8	2	42	–	–	4
Ba	1082	106	700	1280	–	–	2.3
Ce	66	16	39	120	–	–	1.53

Примечание. В табл. 6 и 7: x – среднее содержание, max – максимальное, min – минимальное, σ – стандартное отклонение, ПДК – предельно допустимая концентрация, прочерк – нет данных.

Note. In Table 6 and 7: x – the average content, max – maximum, min – minimum, σ – standard deviation, ПДК – maximum allowable concentration, dash – no data.

в процессе флотации. Лишь в 12.55% исследованных проб обнаружено присутствие ионообменной водо- и кислоторастворимой его формы (рис. 3б).

Медь в техногенных песках хвостохранилища Давендинского месторождения преимущественно находится в ионообменной водо- и кислораство-

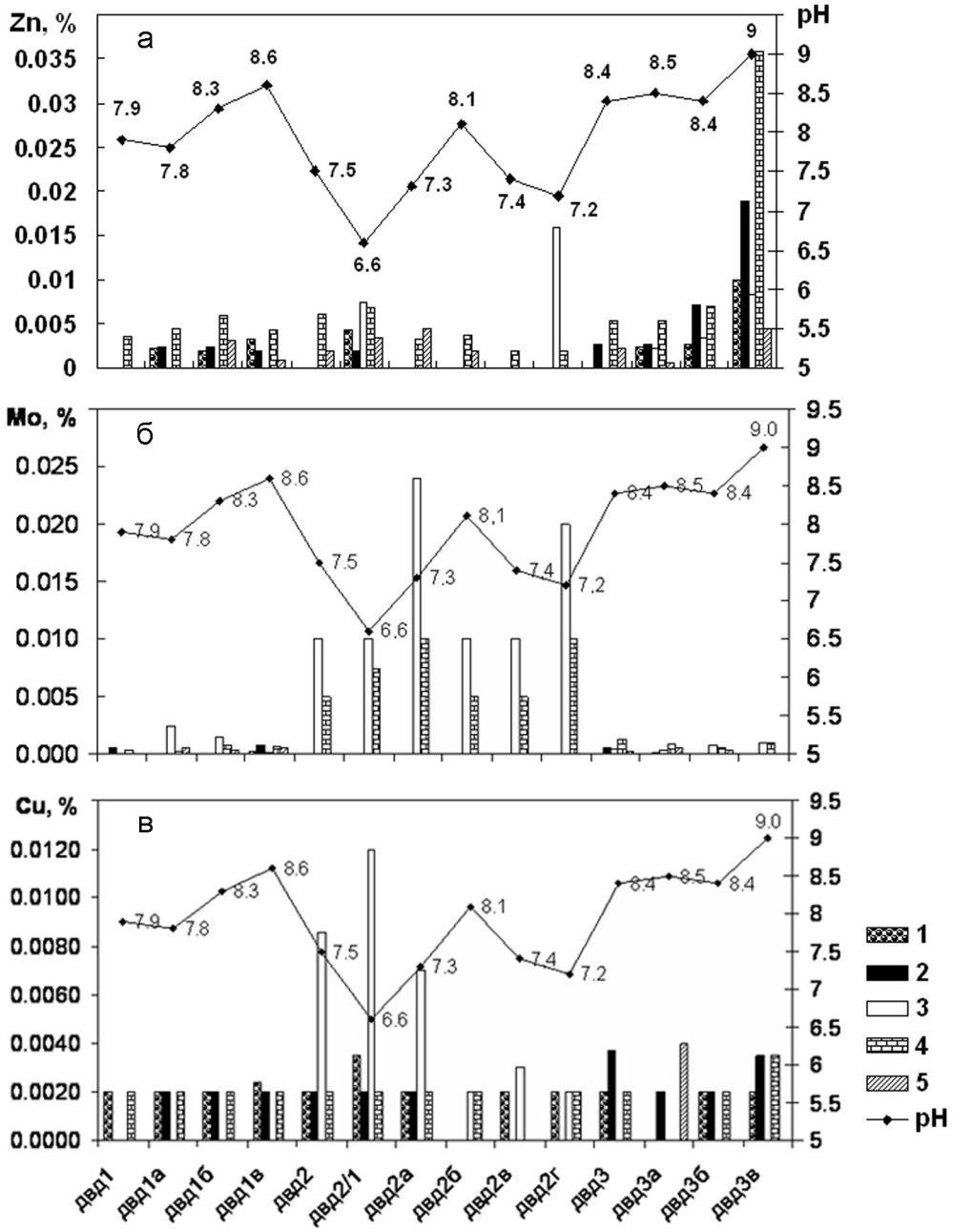

Рис. 3. Распределение цинка (а), молибдена (б) и меди (в) по геохимическим фракциям.

1 – ионообменная водо- и кислоторастворимая, 2 – оксиды железа и марганца, 3 – органическое вещество и сульфиды, 4 – сульфиды, 5 – остаточная.

Fig. 3. Distribution of Zn (a), Mo (б) and Cu (в) at geochemical fractions.

1 – ion exchange water and acid, 2 – oxides of iron and manganese, 3 – organic matter and sulfides, 4 – sulfides, 5 – residual.

римой форме, а также в оксидах железа и марганца и сульфидах. В одной трети проб медь находится и в органических веществах, возможно, элементоорганических соединениях (фракция 3). При этом концентрации их резко завышены на фоне снижения щелочности суспензий. Однако четкой зависимости форм ее от pH не усматривается. Силикатные формы (фракция 5) не распространены. В целом подвижные формы меди составляют 20.9% от его валового содержания (рис. 3в).

Свинец, как показано ранее [27], преимущественно находится в сульфидной форме, а также в оксидах и гидроксидах железа и марганца и практически не имеет подвижных форм. Аналогич-

Таблица 8. Содержание подвижных форм (мас. %) и pH суспензии проб техноземов по вертикальным разрезам

Table 8. The content of mobile forms (wt %) and the pH of the slurry samples tehnosoil on vertical sections

Образец	Интервал опробования, см	Материал	Cu	Zn	Mo	pH
двд1	0–5	Песок м/з	<0.0001	0.0005	0.00010	7.9
двд1а	5–35	Глина	0.0012	0.0015	0.00075	7.8
двд1б	35–50	Песок м/з	0.0016	0.0016	0.00054	8.3
двд1в	50–80	Глина с органикой	0.0027	0.0014	0.00048	8.6
двд2	0–45	Песок м/з	0.0035	0.00038	0.0012	7.5
двд2/1	45–65	Песок с сульфидами	0.0036	0.0037	0.0036	6.6
двд2а	65–155	Песок с/з темно-желтый	0.0031	0.0002	0.0057	7.3
двд2б	155–162	Глина	0.00075	0.00047	0.0047	8.1
двд2в	162–215	Темно-серый песок	0.0017	0.00026	0.0057	7.4
двд2г	215 и более	Желтый песок	0.00088	0.00032	0.0024	7.2
двд3	0–30	Песок и глина	0.0021	0.00093	0.00046	8.4
двд3а	30–65	Песок м/з	0.0015	0.0023	0.00016	8.5
двд3б	65–95	Песок и глина	0.0013	0.0035	0.00029	8.4
двд3в	95–100	Глина розоватая	0.0023	0.012	0.00040	9.0

ные данные получены для технозема Джидинского молибден-вольфрамового комбината [41]. Основное количество мышьяка также сосредоточено преимущественно в сульфидной фракции [27]. Влияние на переход сульфидного мышьяка в подвижное состояние окислительно-восстановительных условий показано также A.A. Carbonell-Barrachina с соавторами [36] и A. Signes-Pastor с соавторами [39]. Они приводят сведения о том, что значительное количество мышьяка при окислении сульфидов захватывается оксидами и гидроксидами железа, в которых он находится в сорбированном состоянии. В ионообменной водо- и кислоторастворимой форме в техноземах Давендинского хвостохранилища он обнаружен лишь в 18.5% исследованных проб. Основная масса мышьяка находится в сульфидной фракции и меньшая – во фракции органического вещества.

Таким образом, к активным подвижным формам рассматриваемых элементов в обычных природных условиях (нормальное атмосферное давление и температуры в диапазоне –18 …+25ºС) следует относить водо- и кислоторастворимые (в том числе в органических кислотах) формы.

Кислотно-основные характеристики образцов и содержание в них подвижных форм меди, цинка и молибдена представлены в табл. 8. Четкой зависимости содержаний подвижных форм меди, молибдена и цинка от pH суспензий техногенных песков не обнаружено, тогда как pH суспензий большинства проб более 7, что указывает в основном на слабощелочную и щелочную обстановки. С выявленными особенностями распределения форм нахождения химических элементов в техноземах связано довольно слабое развитие растительности в пределах хвостохранилища. Она развита преимущественно в его краевых и пониженных, более обводненных, частях. Это, прежде всего, относится к перемычкам и прибортовым участкам (рис. 4), где преимущественно растут береза повислая (*Betula pendula*) и различные ивы. Из других видов древесных растений редко встречаются молоденькие индивиды лиственницы Гмелина (*Larix Gmelini*) и тополя бальзамического (*Populus balsamifera*). Особенностью последнего является вегетативное размножение от одного длинного корня, располагающегося в тонкоилистом слое на глубине всего 10–15 см от песчаной поверхности хвостохранилища. Эти растения содержат высокие концентрации типичных для техноземов химических элементов (мг/кг): Se (<0.001–0.08), Bi (<0.001–0.18), Co (<0.001–0.46), Sb (<0.001–0.55), Cd (0.04–0.83), Ni (<0.001–2.98), As (<0.001–3.63), W (0.01–4.7), Pb (<0.001–7.05), Cu (0.98–10.86), Mo (4.35–91.23), Zn (4.61–218.3). Из приведенных элементов максимальные содержания характерны для меди, молибдена и цинка – типичных биофилов, важнейших микроэлементов живого вещества. В этом отношении показательны и вычисленные для шести элементов коэффициенты их биологического поглощения. Они возрастают в этом же направлении: Sb (0.02–0.04), As (<0.03–0.05), Bi (0.01–0.09), Pb (0.2), Cu (0.01–0.41), Mo (0.2–0.5), Zn (1.05–1.5). Подобные тенденции характерны для полыни Гмелина, заселяющей техноземы хвостохранилища Шерловой Горы [35].

Определены коэффициенты перехода химических элементов из руд в геотехногенный ландшафт: $K_L = C_т/C_р$, где K_L– коэффициент перехода в геотехногенный ландшафт, $C_т$ – содержание элемента в техноземе, $C_р$ – содержание элемента в руде [34].

Для Давендинского хвостохранилища коэффициент K_L, за исключением сурьмы и циркония, меньше 1, как это видно из табл. 9. Этот коэффициент, как показывает опыт сравнения химического состава техноземов многих месторождений Забай-

Рис. 4. Вид на Давендинское хвостохранилище со стороны штольневых отвалов.

Fig. 4. Davendinskoe tailings pond, view from adit dumps.

Таблица 9. Коэффициент перехода основных элементов в геотехногенный ландшафт (K_L)

Table 9. The basic elements transition factor in the geotehnogenic landscape (K_L)

Элемент	Содержание, г/т		K_L
	Технозем	Руда	
Mo	35	2120.0	0.02
Zn	19.0	362.0	0.05
Sn	2.0	24.0	0.08
Ag	0.4	1.6	0.25
Cu	121	382.0	0.32
Bi	21.0	49.0	0.43
Pb	39.0	59.0	0.66
As	79.0	118.0	0.67
Sb	13.0	10.0	1.30
Zr	157.0	50.0	3.14

калья, зависит от рудноформационной принадлежности разрабатываемых месторождений [34] и может быть использован для прогнозирования влияния подготавливаемых к разработке рудных месторождений на состояние окружающей среды.

ВЫВОДЫ

1. В результате комплексного изучения Давендинской природно-геотехногенной системы однозначно установлена преемственность в химическом составе природно-техногенной цепи: руда→почва→технозем→растения.

2. Минеральный состав техноземов отличается от продуктивных минеральных комплексов резким преобладанием силикатной составляющей, содержащей в качестве примесей акцессорные минералы-носители литофилов (Zr, Y, Nb, Ba, Ce, Cs), тонко- и микрозернистую вкрапленность сульфидов, находящихся в сростках с кварцем, а также плохо флотируемых оксидных форм молибдена, сурьмы, висмута и мышьяка, часто заключенных в гидроксидах железа и марганца.

3. Наиболее важные и распространенные химические элементы (Zn, Cu, Mo, Pb, As) находятся в техноземах преимущественно в сульфидной форме, что сказывается на весьма незначительном развитии в хвостохранилище сульфатов и увязывается со щелочными и слабощелочными условиями (pH 7–9). Основными активными подвижными компонентами Zn, Cu, Mo, Pb в этой среде в обычных природных условиях (нормальное атмосферное давление и температуры в диапазоне –18 …+25ºC) являются ионообменные водо- и кислоторастворимые (в том числе в органических кислотах) формы. Доля их находится в пределах 25% от валового содержания. Но доля их собственно водорастворимых форм, легче всего усвояемых растениями, составляет лишь первые проценты, как это показано на примере свинца в техноземах Джидинского Mo-W комбината [41].

4. Первый опыт изучения захвата химических элементов древесными растениями на Давендинском хвостохранилище показал, что они содержат химические элементы, типичные для продуктивных минеральных комплексов и техноземов (по возрастанию концентраций): Se, Bi, Co, Sb, Cd, Ni, As, W, Pb, Cu, Mo, Zn. Из них максимальные содер-

жания характерны для меди, молибдена и цинка – типичных биофилов, важнейших микроэлементов живого вещества. В этом ряду (Sb, As, Bi, Pb, Cu, Mo, Zn) возрастают коэффициенты их биологического поглощения.

5. Коэффициент перехода основных элементов в геотехногенный ландшафт (K_L) Давендинской природно-техногенной геосистемы зависит от минерального состава руды и способа технологии обогащения сульфидных руд. Он минимален для главного рудного элемента (Mo), всех элементов сульфидной ассоциации (Zn, Sn, Ag, Cu, Bi, Pb) и возрастает у главных анионных элементов сульфосолей (As, Sb), которые частично находятся в окисленной плохо флотируемой форме (скородит, стибиконит, сенармонтит).

6. Коэффициент (K_L) может быть использован для прогнозирования влияния на состояние окружающей среды подготавливаемых к разработке рудных месторождений.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, гранты № 08-05-98042-р_сибирь_а, № 13-05-01155_а и № 16-05-01041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапова Л.Я., Абишева З.С., Килибаева С.К., Алтенова А.Н., Рузахунова Г.С., Сапуков И.А. (2014) Комплексная переработка техногенных вольфрамрений-содержащих отходов. *Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: Плаксинские чтения-2014*: *мат-лы Междунар. совещ.* (под общ. ред. В.А. Чантурия, Т.В. Чекушиной). Астана: Центр наук о Земле, металлургии и обогащения, 361-363.
2. Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область). (1967) М.; Иркутск: ГУГК, 176 с.
3. Бачурин Б.А. (2008) Оценка техногенно-минеральных образований горного производства как источников эмиссии тяжелых металлов. *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование*: *тр. II Всерос. симпоз. с междунар. участием и VIII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана.* Чита: ЗабГГПУ, 7-10.
4. Баюрова Ю.Л., Светлов А.В., Макаров Д.В. (2015) Возможности комплексной переработки хвостов обогащения медно-никелевых руд. *Минералогия техногенеза.* **16**, 115-120.
5. Борисов В.А. (1968) О закономерностях пространственного размещения золотого и молибденового оруденения в Амуджикано-Давендинском рудном районе. *Геология некоторых рудных месторождений Забайкалья.* (Отв. ред Ф.И. Вольфсон). Чита, 163-175.
6. Геологические исследования и горнопромышленный комплекс Забайкалья (1999) (Г.А. Юргенсон, В.С. Чечеткин, В.М. Асосков и др., отв. ред. Г.А. Юргенсон). Новосибирск: Наука, 574 с.
7. Геологическое строение Читинской области: Объяснительная записка к геологической карте масштаба 1 : 500 000 (1997) (К.К. Анашкина, К.С. Бутин, Ф.И. Еникеев, А.В. Кинякин, В.П. Краснов, В.А. Кривенко, Б.И. Олексив, Т.А. Пинаева, И.Г. Рутштейн, В.Н. Семенов, Л.П. Старухина, Н.Н. Чабан, Е.В. Шулика). Чита, 239 с.
8. ГОСТ 17.4.4.02–84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического и гельминтологического анализа. М., 1984.
9. ГОСТ 2082.5–81. Концентраты молибденовые. Методы определения мышьяка.
10. ГОСТ Р 50683–94. (1994) Почвы. Определение подвижных соединений меди и кобальта по методу Крупского и Александровой в модификации ЦИНАО: Сб. ГОСТов М.: Изд-во стандартов, 19 с.
11. ГОСТ Р 50686–94. (1994) Почвы. Определение подвижных соединений цинка по методу Крупского и Александровой в модификации ЦИНАО: Сб. ГОСТов. М.: Изд-во стандартов, 16 с.
12. ГОСТ Р 50689–94. (1994) Почвы. Определение подвижных соединений цинка по методу Григга в модификации ЦИНАО: Сб. ГОСТов М.: Изд-во стандартов, 14 с.
13. Дружинин А.В. (1960) Структура Давендинского месторождения. *Основные вопросы и методы изучения структур рудных полей и месторождений*. М.: Госгеолтехиздат, 429-443.
14. Зверева В.П. (2006) Современное минералообразование в техногенных системах оловорудных месторождений Дальнего Востока. *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование*: *тр. I Всерос. симпоз. с междунар. участием и VII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана.* Чита: ЗабГГПУ, 150-154.
15. Зверева В.П., Пятакова А.Д., Костина А.М. (2013) Моделирование процессов окисления сульфидов на хвостохранилищах Кавалеровского района и их влияние на гидросферу (Приморский край). *Экол. химия.* **22**(3), 151-155.
16. Зверева В.П., Пятаков А.Д., Костина А.М., Фролов К.Р., Лысенко А.И. (2012) Оценка воздействия хвостохранилищ оловорудного Кавалеровского района Дальнего Востока на гидросферу методом физико-химического моделирования. *Экол. химия.* **21**(4), 219–224.
17. Зверева В.П., Фролов К.Р., Костина А.М. (2014) Моделирование процессов окисления сульфидов на хвостохранилищах Комсомольского района Хабаровского края в широком интервале температур и их влияние на гидросферу. *Проблемы недропользования* (1), 71-76.
18. Криволуцкая Н.А., Гонгальский Б.И. (1995) Ключевское месторождение. *Месторождения Забайкалья.* (Под. ред. Н.П. Лаверова). Т. I. Кн. 2. Чита; М.: Геоинформмарк, 33-40.
19. Крупская Л.Т., Зверева В.П. (2011) Оценка влияния отходов переработки оловорудного сырья на объекты окружающей среды (на примере Хрустальненского ГОКа). *Сибирский экол. журнал.* **18**(6), 797-803.
20. Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Румянцева Г.Ю. (2008) Минералого-геохимические исследования форм нахождения бериллия в почвах техногенных

ореолов. *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: тр.* ***II Всерос. симпоз. с междунар. участием и VII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана.*** Чита: ЗабГГПУ, 13-16.

21. Литвинов В.Л., Соломин Ю.С. (1964) Зоны повышенной трещиноватости в восточной части Восточного Забайкалья и их роль в распределении постмагматического оруденения. *Изв. вузов. Сер. Геол. и разведка* (2), 83-92.
22. Махинов А.Н., Шевцов М.Н., Музыко С.В., Збарацкий А.А., Акименко Н.Ю., Видищева Г.Г. (2013) Проблемы загрязнения водных ресурсов горнодобывающих районов и пути их решения. *Изв. вузов. Строительство.* (2-3) 78-87.
23. ОСТ 41-08-265–04. (2004) Стандарт отрасли. Управление качеством аналитических работ. М.: ВИМС, 80 с.
24. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых количеств (ОДК) химических веществ в почве ГН 6229–91, 6 с.
25. Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А. Федорова Н.Н. (1995) *Химический анализ почв.* СПб.: СПбГУ, 264 с.
26. Селезнев С.Г., Светлов А.В., Макаров Д.В., Маслобоев В.А. (2014) Возможности извлечения цветных металлов из техногенных месторождений Мурманской области. *Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья. Плаксинские чтения -2014: мат-лы Междунар. совещ.* (Под общ. ред. В.А. Чантурия, Т.В. Чекушиной). Астана: Центр наук о Земле, металлургии и обогащения, 370-372.
27. Смирнова О.К., Сарапулова А.Е., Юргенсон Г.А. (2009) О формах химических элементов в отходах обогащения руд золото-молибденового месторождения Давенда (Восточное Забайкалье). *Минералогия техногенеза-2009.* Миасс: ИМинУрО РАН, 160-169.
28. Смирнова О.К., Ходанович Ю.П., Яценко Р.И. (2006) Тяжелые металлы в техногенных ландшафтах района Джидинского горно-обогатительного комбината. *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: тр. I Всерос. симпоз. с междунар. участием и VII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана.* Чита: ЗабГГПУ, 82-87.
29. Сотников В.И., Берзина А.П., Никитина Е.И., Проскуряков А.А., Скуридин В.А. (1977) *Медно-молибденовая формация.* Новосибирск: Наука, 424 с.
30. Химико-спектральные методы. (1978) *Инструкция № 155-ХС.* М.: Министерство геологии СССР. Научный Совет по аналитическим методам при ВИМСе.
31. Юргенсон Г.А. (2003) *Типоморфизм и рудные формации.* Новосибирск: Наука, 276 с.
32. Юргенсон Г.А. (2006) О некоторых общих проблемах минералогии и геохимии ландшафта исторических горнорудных территорий. *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: тр.* ***I Всерос. симпоз. с междунар. участием и VII Всерос. чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана.*** Чита: ЗабГГПУ, 33-42.
33. Юргенсон Г.А. (2008) *Минеральное сырье Забайкалья. Ч. I. Кн. 3. Благородные металлы.* Чита: Поиск, 256 с.
34. Юргенсон Г.А. (2013) Проблемы геоэкологических и геоэтических последствий разработки месторождений полезных ископаемых на примере Забайкалья: *мат-лы XVI Междунар. научно-практ. конф.* Ч. I. Чита: ЗИПСибУПК, 4-12.
35. Юргенсон Г.А., Солодухина М.А., Смирнов А.А. (2009) К проблеме биологического поглощения вольфрама, молибдена и мышьяка растениями на примере полыни Гмелина. *Вестн. Заб. центра РАЕН*. (1), 16–21.
36. Carbonell-Barrachina A.A., Rocamora A., García-Gomis C., Martínez Sánchez F., Burló F. (2004) Arsenic and zinc biogeochemistry in pyrite mine waste from the Aznalcóllar environmental disaster. *Geoderma* (122), 195-203.
37. Kupriyanova I.I., Rumyantseva G.Yu. (1994) Form of occurrence of beryllium in technogenic haloes around the Yaroslavsky mining and beneficiation plant (Maritime Region). *Geochem. Int*. **31**(12), 216-227.
38. Pueyo M., Mateu J., Rigol A., Vidal M., López-Sánchez J.F., Rauret G. (2008) *Environ. Pollution*. **152**(2), 330.
39. Signes-Pastor A., Burló F., Mitra K., Carbonell-Barrachina A.A. (2007) Arsenic biogeochemistry as affected by phosphorus fertilizer addition, redox potential and pH in a west Bengal (India) soil. *Geoderma.* (137), 504-510.
40. Yurgenson G.A. (2004) Geotechnogenesis problems. *J. Geosci. Res. NE Asia* [*Changchun, China*]. **7**(1), 92-96.
41. Yurgenson G.A. (2015) About the forms of lead in soil tailling Dzhida tungsten-molybdenum plant. 25th Anniversary Goldschmidt, Prague, CZ. Abstracts, 3553. http://goldschmidt.info/2015/uploads/abstracts/finalPDFs/A-Z.pdf

The geochemical features of ores and technosoils of tailings gold-molybdenum mine Davenda in East Transbaikalia

G. A. Yurgenson*, O. K. Smirnova, M. A. Solodukhina*, R. A. Filenko***

**The Institute of Natural Resources, Ecology, and Cryology, Siberian Branch of RAS*
***Geological institute of the Siberian Branch of RAS*

New data on the mineral and chemical composition of the ore, host rocks and technosoils of tailings gold-molybdenum deposit Davenda are outlined. The mineral composition of the ore (%): quartz (96), molybdenite (1, but on average 0.26), pyrite (7), chalcopyrite (2), sphalerite (0.07), galena (to.1), sulphosalts (0.02), bismuthinite (0.2), scheelite (up to 0.02), tungsten (up to 0.01), bornite (0.03), tetradymite (to 0.001) emplektite (rare occurrences) and gold (up to1817g/t). In the oxidation zone developed various sulfates, including large (up to10 cm) gypsum crystals, chalkanthite, malachite, azurite, brochantite, molybdenite, ferrimolybdite. The contents of the main chemical elements, which compose technosoils of tailing, exeed their clarks. Exceptions are zinc, tin, and yttrium. Especially high concentration factors for arsenic, bismuth and molybdenum, which indicates the imperfection of applied technologies of the ores enrichment. The distribution of chemical elements in the geotechnogenic system: productive mineral complex (ore + host rock)→soil→technosoils →plants. Revealed the share of Mo, Zn, Cu, Pb mobile form, in technosoils. Identified acid-base characteristics of technosoils. It was found that the most important of the mobile forms is a water-acid-ion exchange, to a much lesser extent – organic elements.

Keywords: *gold-molybdenum ore, technosoil, tailing, a chemical element, the mobile form, factor of biological absorption, deposit Davenda, Eastern Transbaikalia.*

REFERENCES

1. Agapova L.Ja., Abisheva Z.S., Kilibaeva S.K., Alteno-va A.N., Ruzakhunova G.S., Sapukov I.A. (2014) [Complex processing of technogenic tungsten-rhenium-containing tailings]. *Plaksinskie chtenija-2014. Mezhdunarodnoe soveshchanie "Progressivnye metody obogashchenija i kompleksnoj pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ja".* (Pod obshchej redaktsyej V.A. Chanturija, T.V. Chekushynoj). Astana: AO "Tsentr nauk o Zemle, metalurgii I obogashchenija" Publ., 361-363. (In Russian).
2. *Atlas Zabajkal'ja (Burjatskaja ASSR i Chitinskaja oblast')* [Atlas of Transbaikalia (Buryat Autonomous Republic and Chita region)]. (1967) Moscow; Irkutsk: GUGK Publ., 176 p. (In Russian).
3. Bachurin B.A. (2008) [Assessment of technogenic mineral formations of mining as the sources of emissions of heavy metals]. *Trudy II Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VIII Vserossijskikh chtenij pamjati akad. A.E. Fersmana "Mineralogija i geokhimija landshafta gornorudnykh territorij. Sovremennoe mineraloobrazovanie".* Chita: ZabGGPU Publ., 7-10. (In Russian).
4. Bayurova Ju.L., Svetlov A.V., Makarov D.V. (2015) [The possibilities of complex processing tailings of copper and nickel ores]. *Mineralogija tekhnogeneza.* **16**, 115-120. (In Russian).
5. Borisov V.A. (1968) [On the spatial distribution patterns of gold and molybdenum mineralization in Amudzhikan-Davenda ore region]. *Geologija nekotorykh rudnykh mestorozhdenij Zabajkal'ja.* (Ed. F.I. Vol'fson). Chita, 163-175. (In Russian).
6. *Geologicheskie issledovanija i gornopromyshlennyj kompleks Zabajkal'ja.* (1999) (G.A. Yurgenson, V.S. Chechetkin, V.M. Asoskov i dr., ed. G.A. Yurgenson) [Geological research and mining complex of Transbaikalia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 574 p. (In Russian).
7. *Geologicheskoe stroenie Chitinskoj oblasti: Ob"jasnitel'naja zapiska k geologicheskoj karte masshtaba* 1 : 500 000. (1997) (K.K. Anashkina, K.S. Butin, F.I. Enikeev, A.V. Kinjakin, V.P. Krasnov, V.A. Krivenko, B.I. Oleksiv, T.A. Pinaeva, I.G. Rutshtejn, V.N. Semenov, L.P. Starukhina, N.N. Chaban, E.V. Shulika). [The geological structure of the Chita region: Explanatory note to the geological map of scale 1 : 500 000]. Chita, 239 p. (In Russian).
8. *GOST 17.4.4.02–84. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlja khimicheskogo, bakteriologicheskogo i gel'mintologicheskogo analiza*. (1984) [State Standart 17.4.4.02–84. Conservation of nature. Soils.Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological and helminthological analysis]. Moscow: Standartinform Publ. (In Russian).
9. *GOST 2082.5–81. Koncentraty molibdenovye. Metody opredelenija mysh'jaka.* (1981) [State Standart 2082.5–81. Molybdenum concentrates. Methods for determination of arsenic]. Moscow: Standartinform Publ. (In Russian).
10. *GOST R 50683–94 Pochvy. Opredelenie podvizhnykh soedinenij medi i kobal'ta po metodu Krupskogo i Aleksandrovoj v modifikatsii TsINAO: Sb. GOSTov*. (1994) [State Standart R 50683–94. Soils. Determination of mobile compounds of copper and cobalt by the method Krupskij and Alexandrova in the modification CINAO: Coll. GOST]. Moscow: Standartinform Publ., 19 p. (In Russian).
11. *GOST R 50686–94. Pochvy. Opredelenie podvizhnykh soedinenij tsinka po metodu Krupskogo i Aleksandrovoj v modifikacii TsINAO: Sb. GOSTov.* (1994) [State Standart R 50686–94. Soil. Determination of mobile compounds of zinc by the method Krupskij and Alexandrova in the modification CINAO: Coll. GOST]. Moscow: Standartinform Publ., 16 p. (In Russian).
12. *GOST R 50689–94. Pochvy. Opredelenie podvizhnykh soedinenij tsinka po metodu Grigga v modifikatsii*

TsINAO: Sb. GOSTov. (1994) [State Standart R 50689–94. Soil. Determination of mobile compounds of zinc by the method Grigg in the modification CINAO: Coll. GOST]. Moscow: Standartinform Publ., 14 p. (In Russian).
13. Druzhinin A.V. (1960) [Structure of Davenda deposit]. *Osnovnye voprosy i metody izuchenija struktur rudnykh polej i mestorozhdenij.* Moscow: Gosgeoltekhizdat Publ., 429-443. (In Russian).
14. Zvereva V.P. (2006) [Modern mineral formation in technogenic systems of tin ore deposits of the Far East]. *Trudy I Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VII Vserossijskih chtenij pamjati akad. A.E. Fersmana* "*Mineralogija i geokhimija landshafta gornorudnykh territorij. Sovremennoe mineraloobrazovanie"* Chita: ZabGGPU Publ., 150-154. (In Russian).
15. Zvereva V.P., Pjatakova A.D., Kostina A.M. (2013) [Simulation of sulphide oxidation in tailings Kavalerovo area and their influence on the hydrosphere (Primorye Territory)]. *Ekologicheskaja himija*. **22**(3), 151-155. (In Russian).
16. Zvereva V.P., Pjatakov A.D., Kostina A.M., Frolov K.R., Lysenko A.I. (2012) [Assessing the affect of tin ore tailings Kavalerovo district of the Far East in the hydrosphere by the method of physico-chemical modeling]. *Ekologicheskaja khimija*. **21**(4), 219-224. (In Russian).
17. Zvereva V.P., Frolov K.R., Kostina A.M. (2014) [Simulation of sulphide oxidation in tailings Komsomolsk district of the Khabarovsk Territory in a wide range of temperatures and their impact on the hydrosphere]. *Problemy nedropol'zovanija.* (1), 71-76. (In Russian).
18. Krivolutskaja N.A., Gongal'skij B.I. (1995) [Kliuchevskoe deposit]. *Mestorozhdenija Zabajkal'ja* (Ed. N.P. Laverov). T. I. Kn. 2. Chita; Moscow: Geoinformmark Publ., 33-40. (in Russian).
19. Krupskaja L.T., Zvereva V.P. (2011) [Evaluation of the impact of waste processing of tin ore raw materials for environmental objects (on example, Khrustalnensk GOK)]. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal.* **18**(6), 797-803. (In Russian).
20. Kuprijanova I.I., Shpanov E.P., Rumjanceva G.Ju. (2008) [Mineralogical and geochemical studies of the modes of occurrence of beryllium in soil of technogenic aureoles]. *Trudy I Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VII Vserossijskih chtenij pamjati akad. A.E. Fersmana "Mineralogija i geokhimija landshafta gornorudnykh territorij. Sovremennoe mineraloobrazovanie".* Chita: ZabGGPU Publ., 13-16.
21. Litvinov V.L., Solomin Yu.S. (1964) [The zones of fracturing in the eastern part of the Eastern Transbaikalian and their role in the distribution of postmagmatic mineralization]. *Izv. vuzov. Ser. Geologija i razvedka* (2), 83-92. (In Russian).
22. Makhinov A.N., Shevtsov M.N., Muzyko S.V., Zbarackij A.A., Akimenko N.Yu., Vidishcheva G.G. (2013) [The problems of pollution of water resources mining areas and their solutions]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo.* (2-3). 78-87. (In Russian).
23. OST 41-08-265–04. (2004) *Standart otrasli. Upravlenie kachestvom analiticheskikh rabot* [Industry standard. Quality Management analytical work]. Moscow: VIMS Publ., 80 p. (In Russian).
24. *Perechen' predel'no dopustimykh kontsentratsij (PDK) i orientirovochno dopustimykh kolichestv (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve* [The list of maximum permissible concentration (MPC) and the estimated allowable amounts (EAA) of chemical matter of the soil]. GN 6229–91, 6 p. (In Russian).
25. Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina Je.I., Kasatkina G.A. Fedorova N.N. (1995) *Khimicheskij analiz pochv* [Chemical analysis of soil]. St.Petersburg: St.Petersburg St. Univ. Publ. 264 p. (In Russian).
26. Seleznev S.G., Svetlov A.V., Makarov D.V., Masloboev V.A. (2014) [The possibilities of extraction of nonferrous metals from the waste deposits of the Murmansk region]. *Progressivnye metody obogashchenija i kompleksnoj pererabotki prirodnogo i tekhnogennogo mineral'nogo syr'ja. Plaksinskie chtenija-2014: materialy Mezhdunarodnogo soveshchanija.* Pod obshchej redaktsiej V.A. Chanturija, T.V. Chekushinoj. Astana: Centr nauk o Zemle, metallurgii i obogashchenija Publ., 370-372. (In Russian).
27. Smirnova O.K., Sarapulova A.E., Yurgenson G.A. (2009) [About forms of chemical elements in the wastes of ore gold-molybdenum deposit Davenda (Eastern Transbaikalia)]. *Mineralogija tekhnogeneza-2009.* Miass: IMinUrO RAN Publ., 160-169. (In Russian).
28. Smirnova O.K., Khodanovich Ju.P., Jatsenko R.I. (2006) [Heavy metals in the area technogenic landscapes Dzhida mining factory]. *Mineralogija i geokhimija landshafta gornorudnykh territorij. Sovremennoe mineraloobrazovanie: Trudy I Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VII Vserossijskih chtenij pamjati akad. A.E. Fersmana.* Chita: ZabGGPU Publ., 82-87. (In Russian).
29. Sotnikov V.I., Berzina A.P., Nikitina E.I., Proskurjakov A.A., Skuridin V.A. (1977) *Medno-molibdenovaja formatsija* [Copper-molybdenum formation]. Novosibirsk: Nauka Publ., 424 p. (In Russian).
30. *Khimiko-spektral'nye metody. Instruktsija № 155-HS.* (1978) [Chemical and spectroscopic methods. Instruction № 155-HS]. Moscow: Ministerstvo geologii SSSR. Nauchnyj Sovet po analiticheskim metodam pri VIMSe. (In Russian).
31. Yurgenson G.A. (2003) *Tipomorfizm i rudnye formatsii.* [Typomorphism and ore formations]. Novosibirsk: Nauka Publ., 276 p. (In Russian).
32. Yurgenson G.A. (2006) [About some common problems mineralogy and geochemistry of landscape historic mining areas]. *Mineralogija i geokhimija landshafta gornorudnykh territorij. Sovremennoe mineraloobrazovanie: Trudy I Vserossijskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i VII Vserossijskih chtenij pamjati akad. A.E. Fersmana.* Chita: ZabGGPU Publ., 33-42. (In Russian).
33. Yurgenson G.A. (2008) *Mineral'noe syr'e Zabajkal'ja: Blagorodnye metally. Chast' I. Kniga 3.* [Mineral raw materials of Transbaikalia: Noble metal]. Chita: Poisk Publ., 256 p. (In Russian).
34. Yurgenson G.A. (2013) [Problems of geoecological and geoethical impacts of mineral deposits development on the example of Transbaikalia]. *Materialy XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii.* Ch. I, Chita: ZIPSibUPK Publ., 4-12. (In Russian).
35. Yurgenson G.A., Solodukhina M.A., Smirnov A.A. (2009) [To the problem of biological absorption of tungsten, molybdenum and arsenic by plants on the example

of Artemisia gmelinii]. *Vestnik Zabajkalskogo Centra RAEN.* (1), 16-21. (In Russian).

36. Carbonell-Barrachina A.A., Rocamora A., García-Gomis C., Martínez Sánchez F., Burló F. (2004) Arsenic and zinc biogeochemistry in pyrite mine waste from the Aznalcóllar environmental disaster. *Geoderma* (122), 195-203.
37. Kupriyanova I.I., Rumyantseva G.Yu. (1994) Form of occurrence of beryllium in technogenic haloes around the Yaroslavsky mining and beneficiation plant (Maritime Region). *Geochem. Int*. **31**(12), 216-227.
38. Pueyo M., Mateu J., Rigol A., Vidal M., López-Sánchez J.F., Rauret G. (2008) *Environ. Pollution*. **152**(2), 330.
39. Signes-Pastor A., Burló F., Mitra K., Carbonell-Barrachina A.A. (2007) Arsenic biogeochemistry as affected by phosphorus fertilizer addition, redox potential and pH in a west Bengal (India) soil. *Geoderma.* (137), 504-510.
40. Yurgenson G.A. (2004) Geotechnogenesis problems. *J. Geosci. Res. NE Asia* [*Changchun, China*]. **7**(1), 92-96.
41. Yurgenson G.A. (2015) About the forms of lead in soil tailling Dzhida tungsten-molybdenum plant. 25th Anniversary Goldschmidt, Prague, CZ. Abstracts, 3553. http://goldschmidt.info/2015/uploads/abstracts/finalPDFs/A-Z.pdf