

УДК 550.428:553.4

## ОБ УНАСЛЕДОВАННОСТИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ РУДНОФОРМАЦИОННОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЗАБАЙКАЛЬЯ

Г.А. Юргенсон<sup>1,2</sup>, Р.А. Филенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, Россия

<sup>2</sup>Забайкальский государственный университет, Чита, Россия

Разрабатываемые или отработанные месторождения являются источниками типохимических ассоциаций химических элементов, образующих их токсикогенные концентрации. Содержания Cu, Zn, Cd, Pb, Bi, Sb, W, Sn, Ce, Mo, Sn в технозомах геотехногенных ландшафтов превышают кларки и ПДК. Сквозным элементом рудных формаций, кроме вольфрамовых и собственно молибденовых, является As, для полиметаллических, золоторудных – Sb, для вольфрамовых, олово-полиметаллических, золото-кварц-молибденовых, золото-сульфидно-кварцевых – Bi. Pb является сквозным для всех полиметаллических формаций. Cd типичен для всех формаций, кроме золоторудных и молибденовых.

**Ключевые слова:** рудные месторождения, геохимическая специализация, типохимическая ассоциация, токсикогенная концентрация.

### Введение

Изучение геоэкологического состояния горнопромышленных геосистем в современных условиях относится к приоритетным направлениям, способным заложить основы рационального природопользования. Одним из важнейших аспектов этих исследований являются их минералого-геохимическая классификация на основе их типохимизма и выявление минералого-геохимических факторов прогноза влияния разработки рудных месторождений определенных рудных формаций на окружающую среду.

В этом отношении Забайкалье является одним из крупнейших полигонов России, где горная промышленность зародилась так же, как и на Урале, в XVII в. Открытие и разработка в Восточном Забайкалье свинцово-цинковых руд, содержащих серебро и золото, положили начало более чем трехсотлетней истории горнозаводского дела в России. Именно здесь уже в 1676 г. было получено первое российское серебро. На базе Троицкого полиметаллического месторождения был построен и функционировал Аргунский серебряноплавильный завод, впоследствии получивший название Нерчинского серебряноплавильного завода (1689–1853 гг.), хотя к современному г. Нерчинску непосред-

ственного отношения он не имел и не имеет. Скорее всего, назван он был так потому, что вся эта территория входила в состав Нерчинского воеводства, а затем все заводы были переподчинены Нерчинскому горному округу, который для удобства управления им размещался в селе Нерчинский завод, возникшем при одноименном серебряноплавильном заводе. С 1704 г. Нерчинский серебряноплавильный завод начал выплавлять серебро и свинец [Геологические... 1999; Куриленко, 2006], а с 1717 г. и золото, так называемое первое злато домашнее.

В 1723 г. на территории Юго-Восточного Забайкалья открыто месторождение аквамарина Шерловая Гора, разработка которого ведется по сей день [Kasatkin, Klapotov, Plášil, 2014; Yurgenson, Kononov, 2014]. Затем были построены и задействованы Газимуровский, Кутомарский, Дучарский, Александровский, Шилкинский серебряноплавильные заводы. В середине XVIII в. построен Дучарский, а затем Кутомарский заводы, оставившие после себя 0,9 млн т шлаков с содержанием 3,8–4,91% свинца и 5,31–5,46% цинка [Заворотных, 2001]. На Дучарском месторождении, а затем Солонечном с середины XVIII в. добывали первый флюорит России, использовавшийся как добавка к шихте.

В 1811 г. открыты и начали разрабатываться первые месторождения олова на Ононском месторождении [Геологические... 1999; Вырупаев, 2001]. Все сереброплавильные заводы к началу XX в. перестали функционировать, но отходы горнозаводского производства остались. Первые молибден (Чикойское месторождение), вольфрам и висмут (Шерловая Гора) также добыты в Забайкалье. Огромный вклад Забайкалье внесло в добычу золота в России. Это и первые россыпи по реке Унде, правому притоку Онона, и коренные месторождения: Балейско-Тасеевское, Дарасунское, Ключевское, Любавинское и др. [Игнаткин, 2004].

В связи с открытием в советское время большого числа месторождений молибдена, вольфрама, олова, золота и серебра, флюорита, редких металлов, урана (1930–1993 гг.), была создана мощная горнодобывающая индустрия, разрушенная в 1991–1993 гг.

В результате перестройки остановлена деятельность предприятий с огромными отходами горного производства и исключенными из хозяйственной деятельности земельными отводами. За прошедшие почти 320 лет в результате геологоразведочных и добычных работ накопилось около 650 млн т отходов горного производства с учетом только разработки рудных месторождений. Они включают 1,335 млн т весьма богатых шлаков сереброплавильных заводов. Средние содержания в них свинца находятся в пределах 3,91–7,64%, цинка 1,03–7,59%, а также меди 0,1%, сурьмы 1,3%, олова 0,1%, индия 0,002–0,02%, галлия 0,002–0,02%, серебра 29,93–79,92 г/т, золота 0,09–0,25 г/т. С учетом разработки месторождений бурых и каменных углей, а также месторождений флюорита и редких металлов Забайкальским ГОКом общая масса перемещенных техногенных массивов составляет около 3 млрд т.

### **Цель работы и современное состояние проблемы**

В результате предварительного анализа состояния окружающей среды в пределах исторических горнопромышленных территорий Восточного Забайкалья были выявлены разнообразие геохимической специализации отдельных хвостохранилищ и некая ее зависимость от минералого-геохимических типов разрабатывав-

шихся рудных месторождений. Эти данные нашли отражение в первом обобщении состояния окружающей среды Читинской области, выполненном в 1995 г. [Окружающая... 1995]. В этой работе дан анализ влияния добычи и переработки полезных ископаемых на окружающую среду и намечены основные направления исследований в данном направлении. В результате одной из важных задач стала необходимость сравнительного изучения минералого-геохимической специализации рудных месторождений и отходов горного производства их отработки.

Целью настоящей работы являются обобщение результатов исследований в этой области, выполненных более чем за 15 лет, для определения ассоциаций токсикогенных химических элементов в отходах горного производства и на этой основе прогноз возможной экологической опасности отработки месторождений определенных рудных формаций, а также их влияние на геохимию ландшафта.

С 2005 г. в ИПРЭК СО РАН (лаборатория геохимии и рудогенеза, геоэкологии и гидрогеохимии) и в Забайкальском государственном университете (лаборатория минералогии и геохимии ландшафта) ведутся исследования процессов концентрирования и миграции химических элементов в природных и геотехногенных ландшафтах горнопромышленных районов Забайкалья. Изучены руды и состояния хвостохранилищ бывших рудников, деятельность которых прекращена в 1960–1993-х гг. (Шерловгорского, Хапчерангинского олово-полиметаллических, Шахтаминского молибденового, Давендинского золото-молибденового, Любавинского золоторудного, Кличкинского и Акатуевского полиметаллических и др.), а также действующих (Бом-Горхонского вольфрамового, Новоширокинского, Нойон-Тологойского золото-полиметаллических и Александровского золоторудного с молибденом). Кроме того, на основе изучения минерального и химического состава руд подготовленных к эксплуатации Бугдаинского, Верхнеалиинского месторождений дан прогноз их возможного влияния на окружающую среду [Юргенсон, 2015; Yurgenson, 2004]. В других регионах на примере телетермальных месторождений ртути, колчеданных медно-цинковых, стратифицированных полиметаллических В.А. Алексеенко и соавт. [Алексеенко, Швыдка, Пузанов, 2018;

Alekseenko et al., 2017] показана унаследованность ассоциаций химических элементов в геотехногенном ландшафте, сохраняющаяся на протяжении десятилетий после окончания деятельности горнопромышленных предприятий. Это же относится и к месторождениям вольфрама [Смирнова, 2012], и особенностям циркулирующих в отходах горного производства вод [Плюсин, Жамбалова, Дамаева, 2014; Васильева, Васильев, Смирнова, 2015].

### Методика исследований

Методика исследований предусматривала изучение минералого-геохимического состава руд, состояния хвостохранилищ, минерального и химического состава слагающих их техноземов, а также биогеохимических особенностей пионерных растений, первыми заселяющих хвостохранилища и создающих зоны новообразованных первичных почв, являющихся естественным субстратом природной рекультивации их слабообводненных поверхностей. Всего использовано около 1 600 проб руд и техноземов. Минеральный состав горных пород и руд (195 шлифов и 180 аншлифов) исследован в шлифах и аншлифах на оптическом поляризационном микроскопе AXIO Scope AI. Диагностика и состав минералов уточнены электронно-зондовым методом с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1430 VP (аналитики Е.А. Хромова, Е.В. Ходырева, канд. техн. наук С.В. Канакин, ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, руководитель лаборатории С.В. Канакин). Химический состав руд и техноземов определен методом ICP MS в лаборатории ОАО SGS «Восток Лимитед» в г. Чита (руководитель лаборатории А. Шацких).

### Полученные результаты их обсуждение

В результате изучения минералого-геохимических особенностей 15 месторождений различных рудных формаций и соответствующих им природных и геотехногенных ландшафтов горнопромышленных районов Забайкалья установлено, что месторождения, являющиеся объектом разработки, были и остаются источниками определенных типоморфных ассоциаций химических элементов, образующих их токсикогенные концентрации. Содер-

жания большинства изученных элементов (Cu, Zn, Cd, Pb, Bi, Sb, W, Sn, Ce, Mo, Sn) в техноземах геотехногенных ландшафтов существенно превышают кларки и ПДК.

Для всех изученных месторождений и рудных формаций установлена унаследованность содержаний в рудах и техноземах свинца, цинка, мышьяка, висмута и сурьмы и показано, что эти элементы являются главными источниками экологической опасности в горнопромышленных геосистемах (рис. 1–4).

Из анализа рис. 1 видно, что максимальное содержание свинца установлено в техноземах Хапчерангинского хвостохранилища, образовавшееся в результате отработки одноименного олово-полиметаллического месторождения, минимальное – в хвостохранилищах золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ) Балейского ГОКа. При этом выявлено, что содержание его в техноземах выше, чем в исходной руде. Это связано с тем, что на фабрике ЗИФ № 2 перерабатывались руды двух месторождений: Тасеевского, где свинец находился в галените и сульфосолях, извлекавшихся в гравитационный флотационный концентраты, и Среднеголготайского, свинец которого частично находился в окисленных формах и не извлекался, а уходил в отвал. Этот факт указывает на важность знаний минеральных форм тех или иных токсичных элементов для выбора технологии обогащения и прогноза экологической опасности разработки руд определенного минерального состава.

Цинк также относится к элементам, способным накапливаться в техноземах. Особенностью его, как и сопровождающего кадмия, является высокая подвижность в геотехногенных ландшафтах. Распределение цинка в руде и техноземах показано на рис. 2. Видно, что содержание цинка также минимально в рудах Балейского рудного поля малоглубинной золотосеребряной формации и максимально для руд Хапчерангинского месторождения, но в техноземах минимальны концентрации цинка в хвостохранилище Давендинского золото-молибденового и максимальны для хвостохранилища Нерчинского полиметаллического ГОКа, где складированы хвосты обогащения Кличкинского, Почекуевского и Савинского № 5 полиметаллических месторождений. Для техноземов Тасеевских ЗИФ тенденция, выявленная для свинца, сохраняется. Аналогичная картина наблюдается и для кадмия.

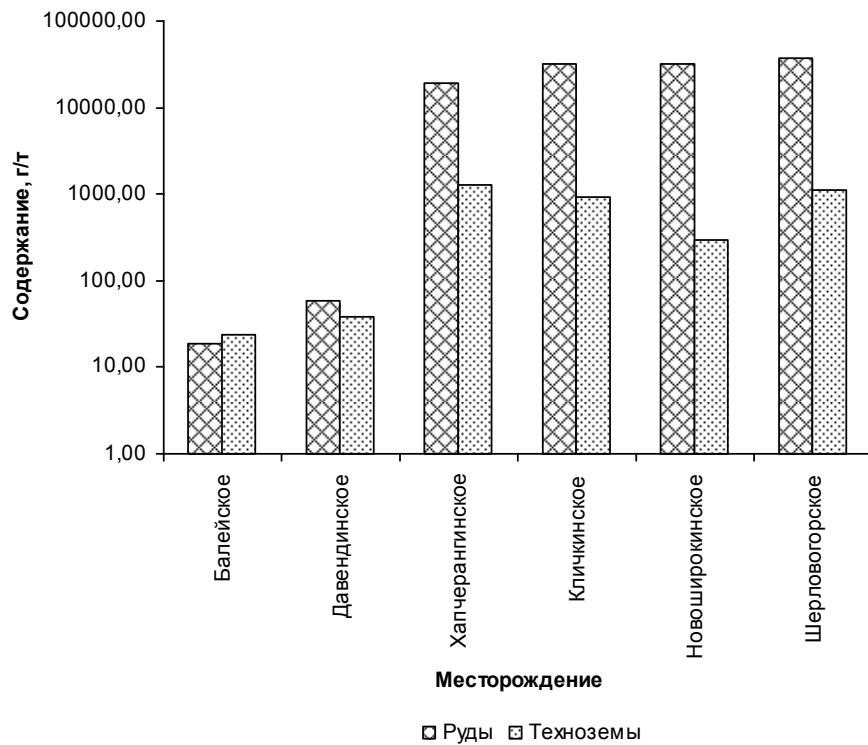


Рис. 1. Соотношение и унаследованность содержаний свинца в рудах обрабатываемых и отработанных месторождений и в техноземах отходов горного производства

Fig. 1. Ratio and inheritance of lead content in ores of mined and spent deposits and in techno soil mining waste

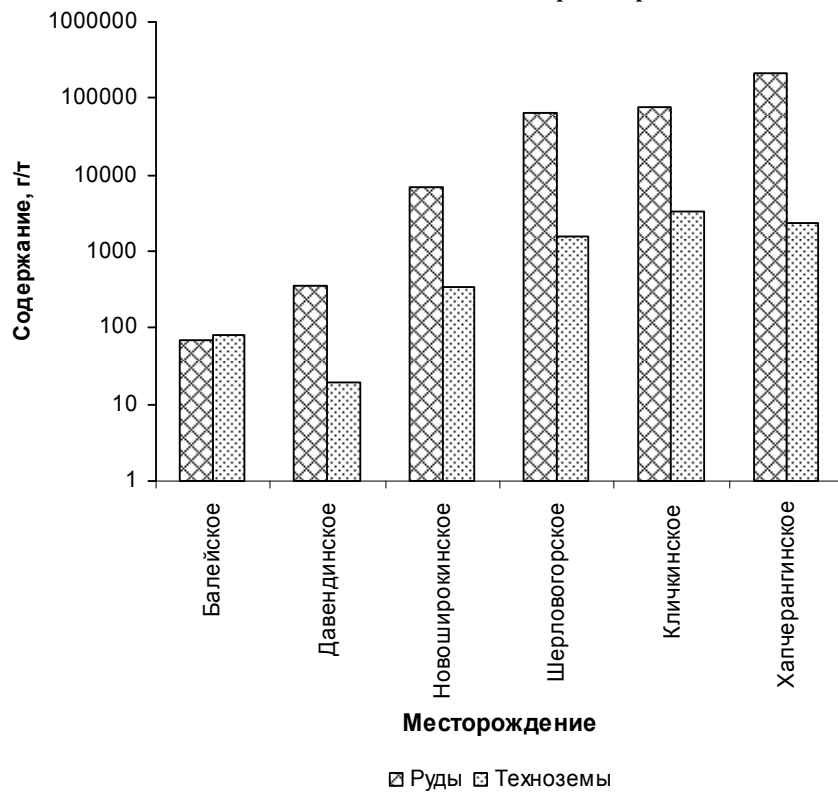


Рис. 2. Соотношение и унаследованность содержаний цинка в рудах обрабатываемых и отработанных месторождений и в техноземах отходов горного производства

Fig. 2. Ratio and inheritance of zinc content in ores of mined and spent deposits and in techno soil mining waste

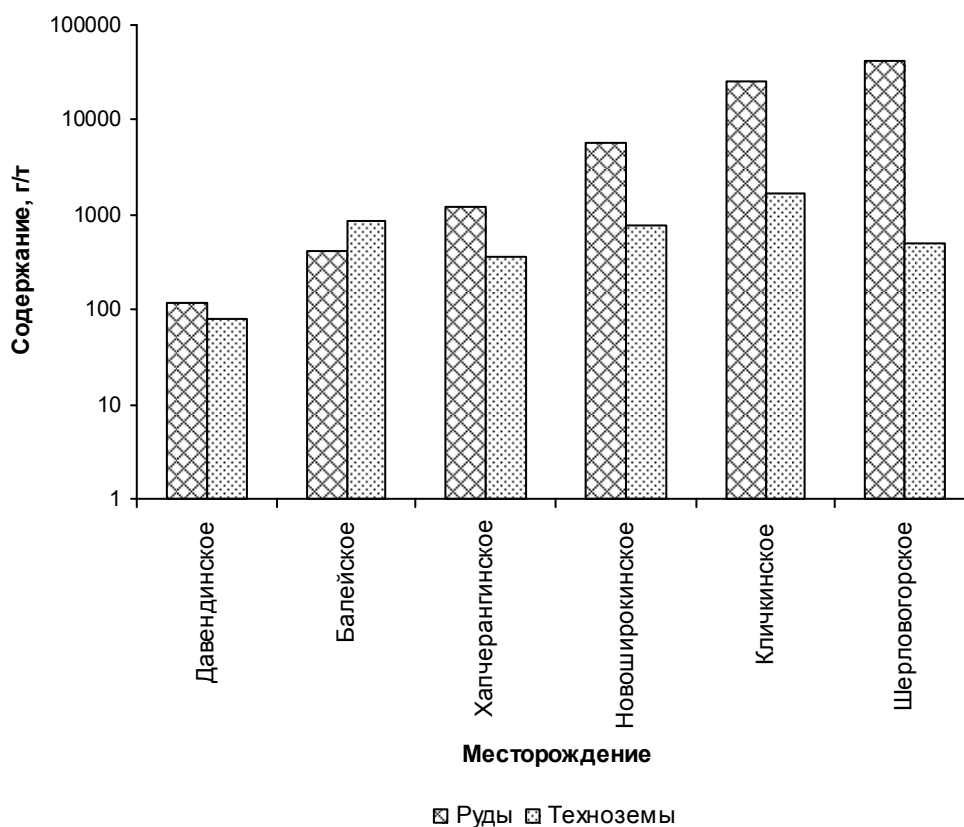


Рис. 3. Распределение мышьяка в руде и техноземах

Fig. 3. Distribution of arsenic in ore and techno soil

Для элементов V группы (As, Sb, Bi) общие тенденции сохраняются, но минимальные концентрации мышьяка в рудах и техноземах характерны для месторождения молибдена (Давендинское), а максимальные – для руд Шерловогорского олово-полиметаллического и техноземов Кличкинского полиметаллических, что вполне закономерно. При этом тенденции изменения соотношений руда / технозем сохраняются (рис. 3, здесь приведены данные для мышьяка).

Для сурьмы характерно повышение концентраций в техноземах по сравнению с рудами, что обусловлено особенностями поведения ее минералов в гравитационном и флотационном способах обогащения руд. Это следует учитывать при прогнозе переработки окисленных руд, содержащих данный элемент.

Все рассмотренные химические элементы образуют, как показано выше, аномально высокие концентрации в рудовмещающих горных поро-

дах, рудах, продуктивных минеральных комплексах, что естественно, и отходах горного производства, в частности, в техноземах в пределах территорий с оруденением определенных рудных формаций. Из них в сверхкларковых концентрациях и концентрациях, превышающих ПДК и ОДК, как показано на примерах изученных месторождений, находятся свинец, цинк, кадмий, мышьяк, сурьма, висмут и, в отдельных случаях, медь и молибден. Эти элементы для рудоносных геосистем Забайкалья являются сквозными в цепи: горная порода → руда → почва (технозем), т.е. они проходят через всю геосистему.

Статистические параметры концентраций определенных элементов для конкретных рудных формаций или месторождений являются их типохимическими признакам, и элементы могут быть признаками их классификации. Средние значения содержания данных элементов приведены на рис. 4.

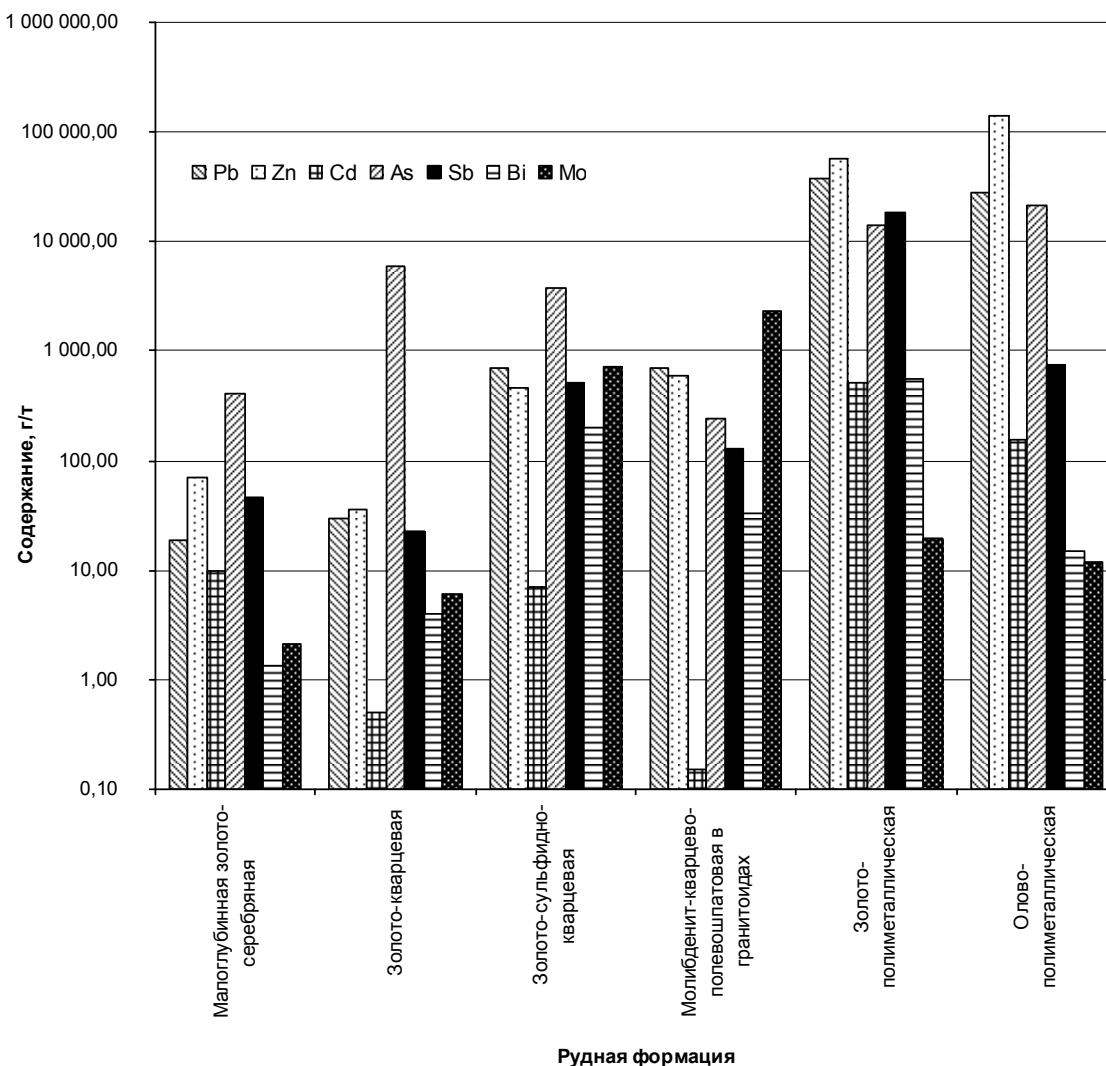


Рис. 4. Типохимические значения сквозных химических элементов геотехногенных ландшафтов для различных рудных формаций

Fig. 4. Typochemical values of through chemical elements of geotechnogenic landscapes for various ore formations

Результаты изучения руд и техноземов хвостохранилищ сведены в таблице. Сопоставление минерального состава руд изученных месторождений с геохимической ассоциацией химических элементов в техноземах позволило их расклассифицировать. Выделены геохимические типы техноземов, соответствующих определенным рудным формациям месторождений. Рудные формации выделены в соответствии с их типохимическими признаками, выявленными нами [Юргенсон, 2003] с учетом представлений, изложенных в работе [Спиридонов, Зорина, Китаев, 2006].

Определено, что содержание большинства выявленных элементов значительно выше их

кларка и ПДК для валовых концентраций в почвах.

Анализ данных таблицы однозначно подтверждает вывод о повсеместном развитии элементов V группы Периодической системы и об их типохимизме для Забайкалья. В зависимости от их концентраций, прежде всего наиболее опасного мышьяка, а также профилирующих главных минералов и химических элементов руд, образующих сверхкларковые и превышающие ПДК и ОДК концентрации в техноземах, выполнена минералого-геохимическая типизация изученных геотехногенных ландшафтов. Выделены две основные группы геосистем: мышьяковые и

безмышьяковые. К первым отнесены геосистемы с содержанием мышьяка в отходах горного производства 300 и более г/т, ко вторым – с меньшими содержаниями. К первым относятся все

золоторудные и полиметаллические месторождения и отходы их разработки. Ко вторым – месторождения вольфрама грейзеновой формации и молибдена.

Т а б л и ц а

**Оруденение определенных рудных формаций и типичные ассоциации химических элементов в технозомах геотехногенных ландшафтов и их концентрации, г/т**

T a b l e

**Mineralization of certain ore formations and typical associations of chemical elements in technosoils of geotechnogenic landscapes and their concentration, ppm**

Месторождение и связанная с ним геосистема	Рудная формация, главные рудные минералы	Геохимическая ассоциация и концентрация	Геохимический тип
Любавинское	Золото-кварцевая, пирит, арсенопирит, золото	As (600), Sb (3), Bi (1), W (9)	Мышьяковый
Балейское	Золото-кварцевая, пирит, арсенопирит, сульфосоли серебра, стибнит, золото	As(800), Sb (100), Zn (90), Te, Se	Мышьяк-сурьмяный
Ключевское	Золото-сульфидно-кварцевая, пирит, халькопирит, сульфосоли, золото	As (300), Sb (60), Bi (9), Cu (450), Pb (56), Mo (5)	Медно-мышьяк-сурьмяный
Среднегологотайское	Золото-сульфидно-кварцевая, пирит, арсенопирит, тетрадимит, золото	As (350), Sb (8), Bi (55), Cu (45), Mo (50), W (2), Te	Мышьяк-висмутовый
Верхнеалиинское	Золото-сульфидно-кварцевая, пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит, халькопирит, тетрадимит, стибнит, золото	As (860), Pb (312), Cu (110), Zn (190), Sb (79), Bi (16), Te	Мышьяк-сурьмяно-висмутовый
Александровское	Золото-сульфидно-кварцевая, пирит, сульфосоли, молибденит	As (340), Sb (12), Mo (320), Zn (42), Bi (2,4)	Мышьяк-сурьмяно-молибденовый
Хапчерангинское	Олово-полиметаллическая, галенит, сфалерит, пирит, арсенопирит, молибденит, висмутин, касситерит, флюорит	Sb (10), As (500) Pb (1260), Mo (26), Zn (2400), Cd (10), Sn (360), Bi (16), F	Свинец-цинк-мышьяково-висмут-кадмиевый
Шерловогорское	Олово-полиметаллическая, галенит, сфалерит, пирит, арсенопирит, касситерит, сульфосоли, вольфрамит, висмутин, флюорит	As (800), Zn (1500), Pb (1000), Cd (10), Sn (120), Bi (12), F, Sb (100), W (50), Tl	Свинец-цинк-мышьяково-сурьмяно-висмут-кадмиевый
Новоширокинское	Золото-полиметаллическая, пирит, галенит, сфалерит, арсенопирит, сульфосоли сурьмы, тетрадимит	As (780), Pb (300), Zn (340), Cd (3), Cu (42), Sb (90), Bi (15)	Мышьяк-свинец-цинк-сурьмяный
Нойон-Тологойское	То же	As (900), Pb (500), Zn (700), Cd (10), Cu (200), Sb (100), Bi (3)	Мышьяк-свинец-цинк-сурьмяный
Кличкинское, Савинское № 5	Полиметаллическая, арсенопирит, галенит, сфалерит, сульфосоли	As (2000), Pb (910), Zn (1400), Cd (20), Sb (70)	Мышьяк-свинец-цинк-сурьмяный
Давендинское	Золото-кварц-молибденитовая, пирит, молибденит, сульфосоли, бисмутинит	Cu (40), Mo (100), Pb (40), As (80), Sb (10), Bi (21)	Молибден-висмутовый
Бугдаинское	Кварц-молибденитовая порфировая, пирит, молибденит, сульфосоли, халькопирит, вольфрамит, шеелит, флюорит	As (53), Sb (14), Pb (95), Mo (900), W (45), F	Молибден-сурьмяный

Месторождение и связанная с ним геосистема	Рудная формация, главные рудные минералы	Геохимическая ассоциация и концентрация	Геохимический тип
Шахтаминское	Кварц-молибденитовая, галенит, молибденит, халькопирит, шеелит, сульфосоли	Cu (300), As (50), Pb (500), Zn (50), Mo (320), W (40), Sb (40)	То же
Бом-Горхонское	Грейзеновая сульфидно-кварцево-гюбнеритовая, гюбнерит, сфалерит, пирит, бисмутинит, халькопирит, тетрадимит, сульфосоли	Zn (800), Cd (16), Bi (260), W (1786), Mo (38), Pb (51), Cu (214), Te	Вольфрам-висмутовый

Среди первых выделены: 1) собственно мышьяковый тип, к которому относятся месторождения золотокварцевой формации; 2) мышьяк-сурьмяный (месторождения малоглубинной золотосеребряной формации) и месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации в гранитоидах; 3) мышьяк-висмутовый и мышьяк-сурьмяно-висмутовый и месторождения в гранитоидах с генетической связью с субщелочными породами среднего состава; 4) мышьяк-сурьмяно-молибденовый в гранитоидах с предельно минимальным содержанием мышьяка; 5) мышьяково-полиметаллический, объединяющий полиметаллические, олово-полиметаллические и золото-полиметаллические формации. Для мышьякового типа характерны широкий круг токсичных элементов и их высокие концентрации в отходах горного производства с

преобладанием сурьмы или висмута в зависимости от геохимической специализации месторождения, а также постоянным присутствием кадмия более 2 г/т, превышающем ОДК.

Ко второму, безмышьяковому вольфрам-висмутовому типу геосистем отнесены месторождения вольфрама и геотехногенные ландшафты Бом-Горхонского и Спокойнинского рудников, а также и остановленных в 1960-х гг. Антоновогорского, Букуинского, Ангатуйского рудников. Три последних разрабатывали кварц-сульфидно-вольфрамитовые месторождения, и отходы содержат токсичные концентрации цинка, кадмия, висмута, вольфрама, молибдена.

К безмышьяковому молибден-сурьмяновому отнесены Бугдаинское и Шахтаминское месторождения и связанные с ними геосистемы.

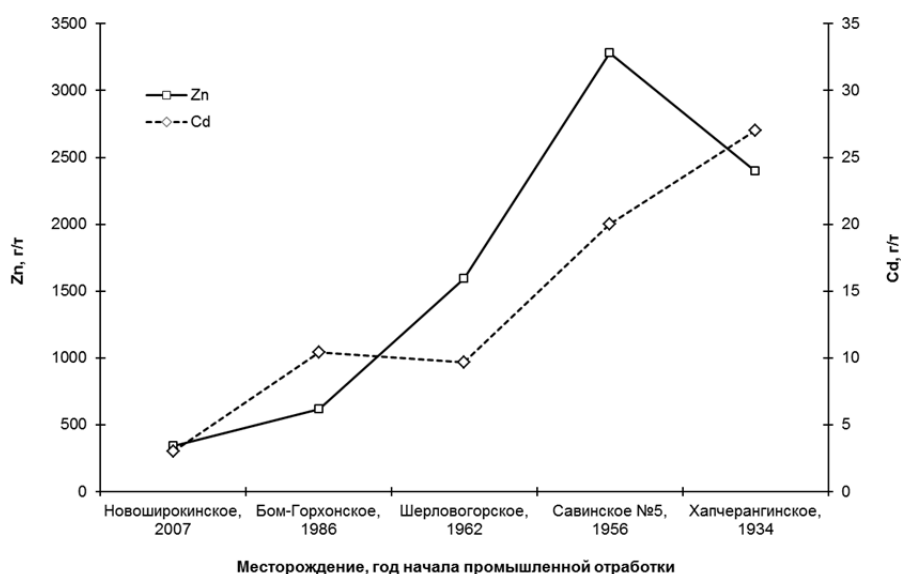


Рис. 5. Изменение содержаний цинка и кадмия в техноземах хвостохранилищ в зависимости от времени начала отработки месторождений

Fig. 5. Changes in the contents of zinc and cadmium in techno soil of tailings, depending on the time of the start of mining of deposits



Сравнительный анализ концентраций Zn и Cd в техноземах месторождений различных рудных формаций показал, что содержания химических элементов зависят не только от количества и соотношения их в исходной руде, но и от технологии и давности их отработки. Применение более совершенных технологий извлечения на обрабатываемых в настоящее время месторождениях обуславливает и более низкое содержание химических элементов в отходах добычи и переработки руд по сравнению со старыми закрытыми или законсервированными рудными объектами (см. рис. 5).

### Заключение

Месторождения, являющиеся объектом разработки, были и остаются источниками определенных типоморфных ассоциаций химических элементов, образующих их токсикогенные концентрации. Содержания большинства изученных элементов (Cu, Zn, Cd, Pb, Bi, Sb, W, Sn, Ce, Mo, Sn) в техноземах геотехногенных ландшафтов существенно превышают кларки и ПДК. Наибольшим распространением из химических элементов, высокие содержания которых представляют экологическую опасность, в изученных ландшафтах пользуются As, Pb, Zn, Sb, Cd и Bi.

Сквозным элементом для всех рудных формаций, кроме вольфрамовых и собственно молибде-

новых, является As. Выявлены две группы типохимических ландшафтов: мышьяковая ( $As \geq 300$  г/т) и безмышьяковая ( $As \leq 300$  г/т). К мышьяковой относятся все полиметаллические и золоторудные, за исключением обогащенных висмутом. Они подразделены на мышьяково-сурьмяные и мышьяково-висмутовые, а также мышьяково-свинцовые, к которым отнесены ландшафты с полиметаллическим оруденением. К безмышьяковой группе отнесены вольфрам-висмутовый и молибден-сурьмяный типы геосистем.

Сурьма является сквозным элементом для большинства геосистем, кроме грейзенового вольфрам-висмутового. Висмут типичен для геосистем с вольфрамовым, олово-полиметаллическим, золото-кварц-молибденовым, золото-сульфидно-кварцевым оруденением. Свинец является сквозным для всех полиметаллических формаций. Наиболее опасный кадмий типичен для всех формаций, кроме золоторудных и молибденовых.

Таким образом, в результате обобщения данных прошлых лет и новых данных, полученных в процессе изучения минералогического геохимического состава первичных и окисленных руд и техноземов в хвостохранилищах, установлено, что ассоциации химических элементов в техноземах зависят от их рудно-формационной принадлежности, а также от технологии переработки руд месторождения.

### Литература

- Алексеев В.А., Швыдкая Н.В., Пузанов А.В.** Геохимические изменения ландшафта, вызванные разработкой рудных месторождений полезных ископаемых // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование : тр. VII Всерос. симп. с междунар. участием и XIV Всерос. Чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана 22–23 августа 2018 г. Чита : Изд-во Заб ГУ, 2018. С. 115–122.
- Васильева Е.В., Васильев В.И., Смирнова О.К.** Физико-химическая модель стока техногенных вод Бом-Горхонского вольфрамового месторождения в экологическую систему реки Зун-Тигня (Забайкальский край) // Минералогия техногенеза-2015. Миасс : ИМин УрО РАН, 2015. С. 155–159.
- Вырупаев А.А.** Ононский оловянный промысел // 300 лет горно-заводского дела в Забайкалье : материалы симп. 9–10 сентября 2001 г. Чита : ИПРЭК СО РАН, 2001. С. 25–30.
- Геологические** исследования и горно-промышленный комплекс Забайкалья / Г.А. Юргенсон, В.С. Четкин, В.М. Асосков и др. Новосибирск : Наука, 1999. 574 с.
- Заворотных И.Р.** Открытие и создание минерально-сырьевой базы Нерчинского горного округа // 300 лет горно-заводского дела в Забайкалье : материалы симп. 9–10 сентября 2001 г. Чита : ИПРЭК СО РАН, 2001. С. 79–92.
- Игнаткин Ю.А.** Очерки золота Забайкалья. Чита : ЦНОП, 2004. 100 с.
- Куриленко И.В.** Нерчинский сереброплавильный завод // Энциклопедия Забайкалья. Читинская область. Т. III: И–Р / гл. ред. Р.Ф. Гениатулин. Новосибирск : Наука, 2006. С. 334.
- Окружающая** среда и условия устойчивого развития Читинской области / А.М. Котельников, О.А. Вотях, А.М. Возмилов и др. Новосибирск : Наука, 1995. 248 с.
- Плюснин А.М., Жамбалова Д.И., Дабаева В.В.** Миграция токсичных элементов в толще намывного хвостохранилища Джидинского ГОКа // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование : тр. V Всерос. симп. с междунар. участием и XII Всерос. Чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана 10–12 декабря 2014 г. Чита : Поиск, 2014. С. 54–59.

**Смирнова О.К.** К минералогии и геохимии хвостов обогащения сульфидно-вольфрамовых руд // Минералогия техногенеза-2012. Миасс : ИМин УрО РАН, 2012. С. 244–251.

**Спиридонов А.Н., Зорина Л.Д., Китаев Н.А.** Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск : Гео, 2006. 291 с.

**Юргенсон Г.А.** Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск : Наука, 2003. 368 с.

**Юргенсон Г.А.** Результаты и проблемы изучения современного минералообразования в геотехногенных ландшафтах исторических горнопромышленных районов // Международная научная конференция. XII съезд РМО. Минералогия во всем пространстве сего слова : материалы XII съезда РМО. СПб., 2015. С. 68–70.

**Alekseenko V.A., Alekseenko A.V., Bogatyrev L.G., Shvydkaya N.V., Benediktova A.I.** Some geochemical features of soils formed under conditions of abandoned mercury deposits in Krasnodar Krai. Moscow University Soil Science Bulletin. 2017. V. 72, № 2. P. 84–91. URL: <https://dx.doi.org/10.3103/S0147687417020028>

**Kasatkin A.V., Klopotov K.I., Plášil J.** Supergene Minerals of Sherlova Gora // Mineralogical Almanac, Ltd. Lakewood, CO80227, USA. 2014. V. 19, is. 2. P. 94–139.

**Yurgenson G.A.** Geotechnogenesis problems // J. Geosci. Res. NE Asia [Changchun, China], 2004. Vol. 7, № 1. P. 92–96.

**Yurgenson G.A., Kononov O.V.** Sherlova Gora: a deposit for Gemstones and Rare Metals // Famous Mineral Localities of Russia: Sherlova Gora // Mineralogical Almanac, Ltd. Lakewood, CO80227, USA. 2014. V. 19, is. 2. P. 12–93.

#### Авторы:

**Юргенсон Георгий Александрович**, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия.

E-mail: [yurgga@mail.ru](mailto:yurgga@mail.ru)

**Филенко Роман Андреевич**, младший научный сотрудник, лаборатория геохимии и рудогенеза, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия.

E-mail: [filrom@yandex.ru](mailto:filrom@yandex.ru)

*Geosphere Research*, 2018, 4, 21–31. DOI: 10.17223/25421379/9/3

**G.A. Yurgenson<sup>1,2</sup>, R.A. Filenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia*

<sup>2</sup> *Transbaikalian State University, Chita, Russia*

#### **ABOUT GENETIC CONNECTION OF GEOCHEMICAL SPECIALIZATION OF WASTES OF MINING PRODUCTION WITH ORE-FORMATION ACCESSORIES OF ORE DEPOSITS ON THE EXAMPLE OF TRANSBAIKALIA**

Mineralogical and geochemical features of 15 deposits of various ore formations and the corresponding natural and geotechnogenic landscapes of the mining areas of Transbaikalia are studied. The inheritance of the chemical composition of mined ores and their waste was established. The fields under development have been and remain sources of certain typological associations of chemical elements forming their toxicogenic concentrations in varying wastes. The contents of most chemical elements (Cu, Zn, Cd, Pb, Bi, Sb, W, Sn, Ce, Mo, Sn) in the technozems of geotechnogenic landscapes significantly exceed the Clarke and MPC for soils. Of the chemical elements whose high concentrations represent an environmental hazard, As, Pb, Zn, Sb, Cd and Bi are the most common in the studied landscapes. Depending on their concentrations in the technozems exceeding the MPC and APC, and the contents of the main minerals and chemical elements of the ores, mineralogical and geochemical typification of the studied geosystems was performed. Two of their main groups were identified: arsenic and antimony. The first are geosystems with arsenic content in mining waste of 300 g/t and more. To the second with its smaller contents, geotechnogenic landscapes from the tungsten deposit of greisen formation and molybdenum. The arsenic type includes geosystems with deposits of gold-quartz formation, arsenic-antimony with deposits of a shallow gold-silver formation and gold-sulfide-quartz in granitoids. Arsenic-bismuth and arsenic-antimony-bismuth types are also associated with deposits of gold-sulfide-quartz formation. Arsenic-antimony-molybdenum in granitoids with extremely minimal arsenic content; arsenic-polymetallic type, associated with deposits of polymetallic, tin-polymetallic and gold-polymetallic formations. This type is characterized by a wide range of toxic elements and their high concentrations in mining waste with a predominance of antimony or bismuth, depending on the geochemical specialization of the field, as well as the constant presence of cadmium over 2 g/t, exceeding the APC. Antimony is widespread in the mining wastes of polymetallic and gold ore deposits, with the exception of those enriched with bismuth. Bismuth forms environmentally hazardous contents in the products of processing of tungsten, tin-polymetallic, gold-quartz-molybdenum, gold-sulfide-quartz formations. Lead is a cross-cutting product for the processing of deposits from all polymetallic formations. The most dangerous cadmium is typical for all formations, except gold and molybdenum. Its minimum, albeit dangerous concentrations are typical for geotechnogenic landscapes of molybdenum and gold-molybdenum ore formations. It is shown that the

associations of chemical elements in technozems depend not only on their ore-formational affiliation, but also on the technology of processing ore deposits.

**Keywords:** ore deposits, geochemical specialization, typochemical association, toxicogenic concentration.

### References

Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Puzanov A.V. *Geokhimicheskie izmeneniya landshafta, vyzvannye razrabotkoy rudnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Geochemical changes in the landscape caused by the development of ore mineral deposits] // Mineralogiya i geokhimiya landshafta gomorudnykh territoriy. Racional'noe prirodopol'zovanie. Sovremennoe mineraloobrazovanie: Trudy VII Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i XIV Vserossiyskikh chteniy pamyati akad. A.E. Fersmana 22–23 avgusta 2018 g. Chita: Izd-vo Zab GU, 2018. pp. 115–122. In Russian

Vasil'eva E.V., Vasil'ev V.I., Smirnova O.K. *Fiziko-khimicheskaya model' stoka tekhnogenykh vod Bom-Gorkhonskogo vol'framovogo mestorozhdeniya v ehkologicheskuyu sistemu reki Zun-Tignya (Zabaykal'skiy kray)* [Physico-chemical model of the flow of technogenic waters of the Bom-Gorkhon tungsten deposit into the ecological system of the river Zun-Tignya (Transbaikal region)] // Mineralogiya tekhnogeneza-2015. Miass: IMin UrO RAN, 2015. pp. 155–159. In Russian

Vyrupaev A.A. *Ononskiy olovyannyi promysel* [Onon tin mining] // 300 let gorno-zavodskogo dela v Zabaykal'e / Materialy simpoziuma 9–10 sentyabrya 2001 g. Chita: IPREK SO RAN, 2001. pp. 25–30. In Russian

*Geologicheskie issledovaniya i gorno-promyshlennyy kompleks Zabaykal'ya* [Geological research and mining complex of Transbaikalia] // G.A. Yurgenson, V.S. Chechetkin, V.M. Asoskov i dr. Novosibirsk: Nauka, 1999. 574 p. In Russian

Zavorotnykh I.R. *Otkrytie i sozdanie mineral'no-syr'evoy bazy Nerchinskogo gornogo okruga* [Discovery and creation of the mineral resource base of the Nerchinsky mining district] // 300 let gorno-zavodskogo dela v Zabaykal'e / Materialy simpoziuma 9–10 sentyabrya 2001 g. Chita: IPREK SO RAN, 2001. pp. 79–92. In Russian

Ignatkin Yu.A. *Oчерки zolota Zabaykal'ya*. [Sketches of gold Transbaikalia]. Chita: TSNOP, 2004. 100 p. In Russian

Kurilenko I.V. *Nerchinskiy serebroplavil'nyy zavod* [Nerchinsk Silver Smelting manufactory] // Entsiklopediya Zabaykal'ya. Chitinskaya obl. T.III. I–R. Gl. Red. R.F. Geniatulin Novosibirsk: Nauka, 2006. pp. 334. In Russian

*Okruzhayushchaya sreda i usloviya ustojchivogo razvitiya Chitinskoj oblasti*. [Environment and conditions of sustainable development of the Chita region] / A.M. Kotelnikov, O.A. Votakh, A.M. Vozmilov i dr. Novosibirsk: Nauka, 1995. 248 p.

Plyusnin A.M., Zhambalova D.I., Dabaeva V.V. *Migratsiya toksichnykh elementov v tolshche namyvnogo khvostokhranilishcha Dzhidinskogo GOKa* [Migration of toxic elements in the alluvial tailings of the Dzhida mining factory] // Mineralogiya i geokhimiya landshafta gomorudnykh territoriy. Ratsional'noe prirodopol'zovanie. Sovremennoe mineraloobrazovanie: Trudy V Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem i XII Vserossiyskikh Chteniy pamyati akad. A.E. Fersmana 10–12 dekabrya 2014 g. Chita: Poisk, 2014. pp. 54–59. In Russian

Smirnova O.K. *K mineralogii i geokhimii khvostov obogashcheniya sul'fidno-vol'framovykh rud* [To mineralogy and geochemistry of sulphide-tungsten ores concentration tailings] // Mineralogiya tekhnogeneza-2012. Miass: IMin UrO RAN, 2012. pp. 244–251. In Russian

Spiridonov A.N., Zorina L.D., Kitaev N.A. *Zolotonosnye rudno-magmaticheskie sistemy Zabajkal'ya*. [Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia] Novosibirsk Izd-vo «Geo», 2006. 291 p. In Russian

Yurgenson G.A. *Tipomorfizm i rudnye formatsii* [Typomorphism and ore formations]. Novosibirsk: Nauka, 2003. 368 p. In Russian

Yurgenson G.A. *Rezultaty i problemy izucheniya sovremennogo mineraloobrazovaniya v geotekhnogenykh landshaftakh istoricheskikh gornopromyshlennykh rajonov* [Results and problems of studying modern mineral formation in geotechnogenic landscapes of historical mining regions] // Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya. XII s"ezd RMO. Mineralogiya vo vsem prostranstve sego slova. Materialy XII s"ezda RMO. SPb, 2015. pp. 68–70. In Russian

Kasatkin A.V., Klopotov K.I., Jakub Plášil. *Supergene Minerals of Sherlova Gora* // Mineralogical Almanac Ltd, Lakewood, CO80227, USA, 2014. V. 19 issue 2. P. 94–139.

Yurgenson G.A. *Geotechnogenesis problems* // J. Geosci. Res. NE Asia [Changchun, China], 2004. Vol. 7. № 1. P. 92–96.

Yurgenson G.A., Kononov O.V. *Sherlova Gora: a deposit for Gemstones and Rare Metals* // Famous Mineral Localities of Russia: Sherlova Gora // Mineralogical Almanac, Ltd. Lakewood, CO80227, USA, 2014. V. 19 issue 2. P. 12–93.

### Authors:

**Yurgenson Georgiy A.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, professor, Chemistry department, Transbaikal State University, Chita, Russia.

E-mail: yurgga@mail.ru

**Filenko Roman A.**, Junior Researcher, Laboratory of Geochemistry and Ore Genesis, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS, Chita, Russia.

E-mail: filrom@yandex.ru