

## Современное минералообразование в местах складирования отходов горнорудной промышленности

О.К.СМИРНОВА, А.М.ПЛЮСНИН, З.И.ХАЖЕЕВА (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН); 670047, г. Улан-Удэ, ул.Сахьяновой, д.6а)

Приводятся сведения о находках новообразованных минералов и обстановках, в которых происходит современное минералообразование в хранилищах отходов переработки сульфидно-гюбнеритовых и молибденитовых руд Джидинского месторождения (Западное Забайкалье), сульфидно-гюбнеритовых руд месторождения Бом-Горхон (Восточное Забайкалье), а также на территории подготовленных к эксплуатации полиметаллических месторождений Холоднинское (Северное Прибайкалье) и Озерное (Западное Забайкалье). Обсуждается роль этого процесса в загрязнении окружающей среды.

*Ключевые слова:* Забайкалье, месторождения вольфрама, молибдена и полиметаллов, сульфидсодержащие руды, отходы обогащения, современное минералообразование.

Смирнова Ольга Константиновна, meta@gin.bscnet.ru  
Плюснин Алексей Максимович, plusnin@gin.bscnet.ru  
Хажеева Зинаида Ивановна, zkhazh@geo.stbur.ru

## Modern mineral formation in banks of technogenous mining wastes

O.K.SMIRNOVA, A.M.PLYUSNIN, Z.I.KHAZHNEVA

Information on finds of modern mineral and condition for their formation in dumps of tailings of sulfide-hubnerite and molybdenum ores of Dzidinskoe deposit (West Transbaikalia), sulfide-hubnerite ores of Bom-Gorhon deposit (East Transbaikalia), spoil banks on Holodninskoe (North Transbaikalia) and Ozernoe (West Transbaikalia) base metal deposits is treated in the present paper.

Consequence of the processes in pollution of environment is discussed.

*Key words:* Transbaikalia, tungsten, molybdenum and base metal deposits, sulfide-bearing ores, mining wastes, modern mineral formation.

В зоне гипергенеза месторождений, руды которых содержат сульфиды, сульфосоли и другие серосодержащие соединения, в связи с низкотемпературными процессами окисления, испарения и выветривания появляется большое количество разнообразных сульфатов [14]. При отработке месторождений формируются массивы отходов горнорудного и обогатительного производства, в которых образование сульфатов происходит в связи с такими же процессами, как и в природных системах, но в значительно больших объемах. Новообразованные сульфаты, содержащие кристаллизационную воду, часто легко растворимые, служат концентраторами потенциально токсичных химических элементов, в первую очередь, тяжелых металлов. Благодаря своей эфемерности, способности кристаллизоваться на испарительных, гидродинамических и других барьерах и вновь растворяться при повышении влажности окружающей среды, эти минералы способствуют миграции опасных для биологических систем элементов из хвостохранилищ в окружающие ландшафты. Места концентрированно-

го образования современных минералов являются визуальными показателями участков потоков дренажных и рудничных вод, на которых они очищаются от загрязняющих окружающую среду элементов [12].

Проведено изучение материала хвостохранилищ сульфидно-вольфрамовых месторождений, одно из которых (Джидинское) законсервировано, а второе (Бом-Горхон) отрабатывается по настоящее время. Получены данные о составе и характере локализации современных минералов на территории колчеданно-полиметаллических месторождений Холоднинское и Озерное, подготовленных к эксплуатации. Цель изучения — установление форм нахождения некоторых тяжелых металлов, в первую очередь, свинца, цинка и меди, в лежалых отходах обогащения сульфидсодержащих руд и местах складирования вскрышных пород на этих объектах. Для идентификации минеральных образований применены методы химического анализа, в т.ч., селективной экстракции, рентгенофлуоресцентного, рентгенострук-

турного, термического анализа, сканирующей электронной микроскопии.

**Джидинское месторождение** молибденитовых и сульфидно-гюбнеритовых руд расположено на юге Западного Забайкалья. Оно обрабатывалось с 1930-х годов и было законсервировано в 1997 г. Минералогия месторождения богата и детально изучена [8, 9 и др.]. Рудные минералы представлены разнообразными сульфидами, сульфосолями железа, свинца, цинка, меди, висмута, молибдена, вольфраматами кальция, железа и марганца, блёклыми рудами. За период эксплуатации месторождения создано два хвостохранилища — насыпное и намывное, в которых накоплено 40 млн.т отходов обогащения, представляющих собой, в основном, средне- и мелкозернистые пески. В результате аварийных сбросов и размыва хвостохранилищ дождевыми и паводковыми водами, в долине р.Модонкуль, относящейся к водосборной территории оз.Байкал, сформированы пролювиальная, аллювиальная и дельтовая залежи техногенных песков. Поскольку при переработке руды извлекались только молибденит и гюбнерит, содержание остальных сопутствующих рудных элементов в хвостах отражает состав руд и снижается в переложенных техногенных образованиях (пролювиальный и аллювиальный шлейф, дельтовая залежь) по мере увеличения дальности перемещения материала от участков первичного накопления отходов в насыпном и намывном хвостохранилищах (табл. 1).

**Материал для исследования отбирался в поверхностном слое намывного хвостохранилища** — самого крупного массива техногенных песков на территории. Поверхность бывшего гидроотвала после консервации горнообогатительного производства осушена и увлажняется периодически во время дождей. Кроме того, массив хвостохранилища дренируется ручьем Барун-Нарын, в долине которого он расположен; рН водных вытяжек проб техногенных песков изменяется от 5 до 8, в среднем это близнеитральная кислотнo-щелочная обстановка. Изучение форм нахождения свинца, цинка и меди с помощью метода селективной экстракции, предложенного A.Tessier с соавторами [17] позволило установить степень окисленности минералов этих металлов, которая уменьшается в ряду Pb Zn Cu [11] и хорошо согласуется с рядом устойчивости сульфидов в близких к нейтральным условиям, приведенном в работе Е.В.Белогуб с соавторами [3]. Трехлетние наблюдения динамики содержания подвижных форм металлов выявили тенденцию к увеличению относительной доли их на фоне снижения валового содержания. Изменился и баланс форм металлов: для всех трех металлов увеличилась доля ионообменных форм; уменьшилась доля карбонатных форм меди и цинка; существенно увеличилась доля меди, связан-

**1. Среднее содержание химических элементов в отходах обогащения руд Джидинского месторождения (в мг/кг)**

Компоненты	Хвостохранилище		Шлейф		Залежь в дельте р.Модонкуль
	Насыпное	Намывное	Пролювиальный	Аллювиальный	
Cd	10	10	11	4	3
Pb	1200	2100	740	370	310
Zn	800	1000	490	250	230
W	1120	640	560	400	320
Ag	15	15	8	4,4	3,6
Be	30	80	62	35	30
Cu	400	200	170	150	240
As	50		10	10	
F	15400	10900	2860	1580	
Cr	100	500	691	559	420
Ni	20	50	46	44	41
Co	10	20	13	22	13
Mo	150	20	65	58	
Sb	11		12	18	
Mn	1100	2300			
V	50	340	770	180	70

ная с железомарганцевыми оксидами и уменьшилась относительная доля ее в органоминеральной фракции (табл. 2).

Наиболее легко растворимый в окислительных условиях галенит в хвостохранилище практически всегда в той или иной степени замещен англезитом, образующим пленки на его зернах (рис. 1), и церусситом, развивающимся по плоскостям спайности и формирующим скелетные кристаллы. Сфалерит, вероятно, разлагается с образованием промежуточных хорошо растворимых соединений, которые мигрируют в грунтовых и поверхностных водах и осаждаются на испарительных барьерах, образуя порошковатые рыхлые массы, в которых под электронным микроскопом и с помощью рентгеноструктурного анализа установлены госларит —  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , цинкмелантерит —  $ZnMgMnFe(SO_4)_2(OH) \cdot 7H_2O$ . В этих же массах диагностирован мелантерит —  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ . Водный сульфат меди — халькантит наблюдался авторами только в пределах склада сульфидного продукта за пределами намывного хвостохранилища.

Новообразования гипса отмечаются на поверхности почвы в районе впадения рудничных вод одной из штолен в р.Модонкуль. На участках под дамбой хвостохранилища, где разгружаются дренирующие толщу отходов обогащения сульфидно-гюбнерито-

2. Динамика форм нахождения меди, цинка и свинца в хвостохранилище Джидинского месторождения, % от валового содержания металла в пробе

Компоненты	Фракция						Органические соединения		Подвижные формы *	
	Ионообменная		Карбонатная		Оксидов Fe и Mn					
	2006 г.	2009 г.	2006 г.	2009 г.	2006 г.	2009 г.	2006 г.	2009 г.	2006 г.	2009 г.
Cu	Нет	$\frac{14,5}{9-20}$	$\frac{10,7}{7-17}$	$\frac{6,5}{3-11}$	$\frac{10,9}{6,3-15,5}$	$\frac{51,3}{45-60}$	$\frac{64,7}{54-71}$	$\frac{5,2}{4-6,7}$	$\frac{12,1}{9-18}$	$\frac{20}{14-27}$
Zn	$\frac{2,94}{2-6}$	$\frac{25,05}{14-42}$	$\frac{16,03}{5-40}$	$\frac{8,4}{4-13}$	$\frac{16,7}{8,5-22,3}$	$\frac{22,4}{14-44}$	$\frac{13,9}{7,8-26}$	$\frac{43,6}{37-49}$	$\frac{19,2}{7-40}$	$\frac{39,8}{21-60}$
Pb	$\frac{9,96}{4-25}$	$\frac{36,6}{27-61}$	$\frac{35,14}{24-54}$	$\frac{37}{28-45}$	$\frac{53,4}{35,4-65}$	$\frac{11,3}{8-15,8}$	$\frac{2,41}{1,2-4}$	$\frac{14,67}{10-16,5}$		

Примечание. Числитель — среднее по 9 пробам и по 6 пробам, знаменатель — разброс значений; \* — содержание подвижных форм меди и цинка определено по ГОСТ с использованием ацетатно-аммонийного буфера.

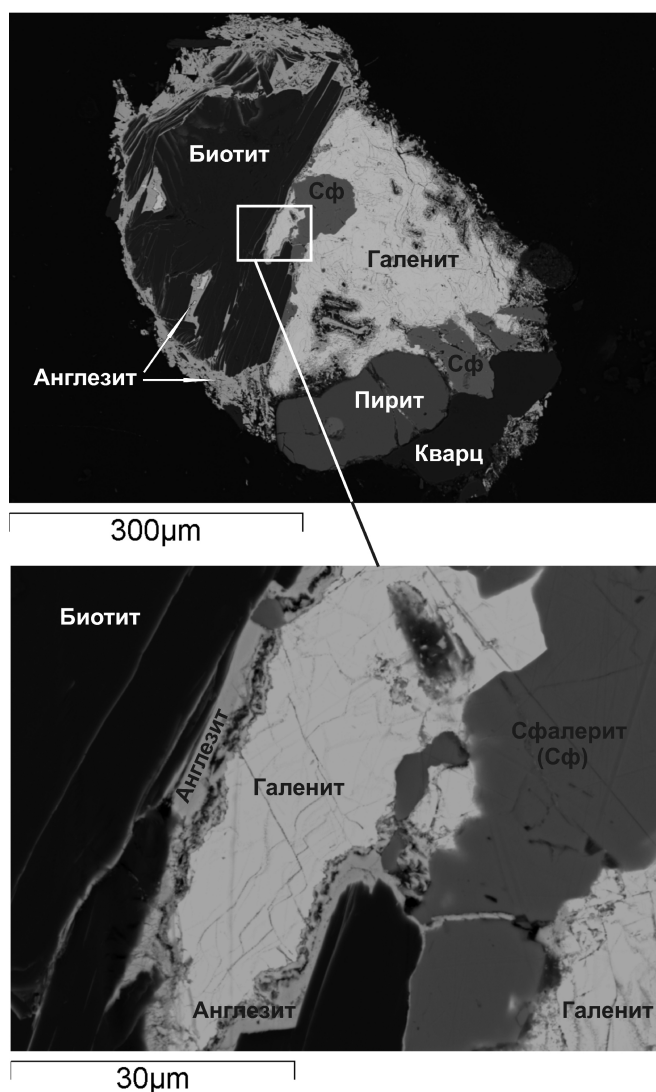


Рис. 1. Замещение галенита англезитом в сростке сульфидов с биотитом из хвостохранилища Джидинского месторождения. Изображения получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ)

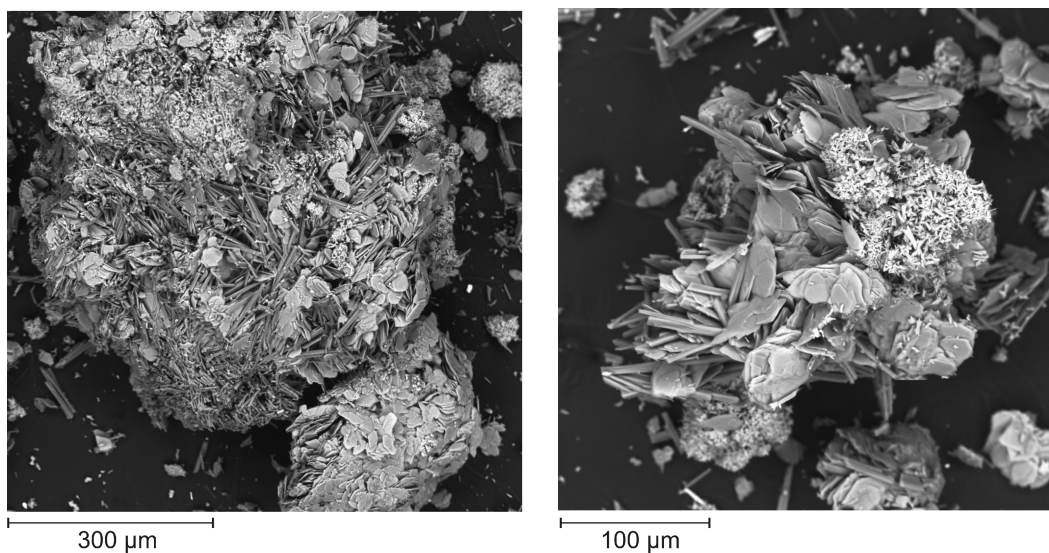
вых руд воды ручья Барун-Нарын, также образуется гипс, мелкие кристаллы которого покрывают растения, почву и различный мусор, находящийся на поверхности земли. В аллювии ручья, на участке резкого изменения скорости потока воды, на гальках обнаружены корки минеральных новообразований, диагностированные как водный ортосиликат-фторид кальция и алюминия [12]. В пойменных отложениях р.Модонкуль на участке, где в нее впадают дренажные воды р.Барун-Нарын, на мелкой гальке обнаружены образования в виде корочек желтоватого цвета, на которые нарастают белые игольчатые кристаллы. В этом материале с помощью рентгеноструктурного анализа диагностированы магнезиокопиапит —  $(MgFe)_4SO_4(OH)_2 \cdot 20H_2O$ , минералы группы роценита и гипс (табл. 3). При электронно-микроскопическом изучении этих образцов в них установлен галотрихит, содержащий до 5% цинка (рис. 2). Химический состав вод, дренирующих техногенные пески ниже участка образования этих минералов, меняется, в них существенно уменьшается содержание сульфат-иона и фтора, трехвалентного железа, калия и кальция (табл. 4).

**Месторождение Бом-Горхон** находится в Петровско-Забайкальском районе Забайкальского края и обрабатывается старательской артелью с 1971 г. Месторождение по минеральному составу руд и структуре очень похоже на Джидинское, отличаясь меньшими размерами и более высоким содержанием в рудах минералов висмута [2, 8]. При производстве губноритового концентрата в качестве побочного производится сульфидный промпродукт. Он состоит в основном из пирита с небольшим количеством сульфидов висмута, цинка, меди, свинца. На поверхности складированных сульфидных концентратов летом 2010 г. обнаружены рыхлые скопления порошкообразных масс, пористых агрегатов белого, желтоватого и голубоватого цвета. Методами рентгеновской дифрак-

**3. Результаты рентгенофазового анализа образца корки новообразований на гальке из аллювия ручья Барун-Нарын, дренирующего Джидинское хвостохранилище**

Относительная интенсивность дифракционных пиков (I)	Расшифровка дифрактограммы образца, d (Å)			
	Расчетное для дифрактограммы образца	Магнезиокопиапит (MgFe <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> · 20H <sub>2</sub> O), [15]	Минералы группы роценита (FeSO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O, (Zn,Mg)SO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O), [16]	Гипс (CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O), [7]
90	18,57	18,62		
100	9,28	9,30		
80	7,61			7,59
30	6,81		6,83	
25	6,13	6,16		
30	5,58	5,59		
100	5,46		5,49	
30	4,68		4,70	
90	4,49		4,49	
15	4,21	4,20		
70	3,96		3,95	
15	3,81			3,79
20	3,49	3,48		
35	3,39		3,37	3,79
30	3,23		3,25	
20	2,95		2,96	
10	2,57		2,96	

Примечание. d (Å) — межплоскостное расстояние.



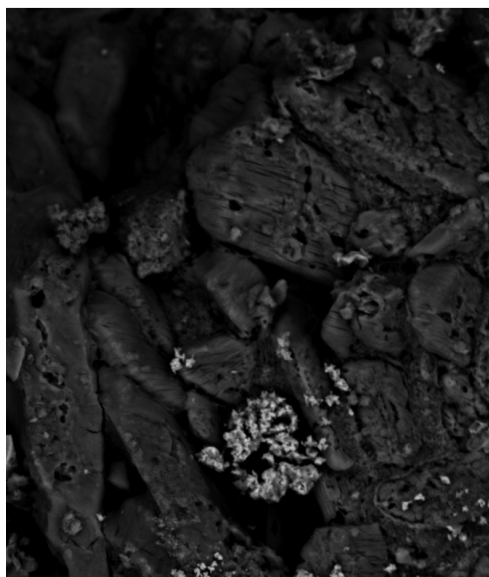
**Рис. 2. Минеральные новообразования на аллювии в ручье, дренирующем Джидинское хвостохранилище. Изображения получены на электронном сканирующем микроскопе (СЭМ):**

кристаллы: пластинчатые — магнезиокопиапит, игольчатые — цинксодержащий галотрихит; мохоподобный агрегат — минерал из группы роценита (водный сульфат цинка и железа)

**4. Химический состав воды в ручье, дренирующем Джидинское хвостохранилище, выше и ниже участка современного минералообразования (в мг/л)**

Компоненты, параметры	Места отбора проб воды	
	Из-под дамбы хвостохранилища, выше участка минералообразования	Ниже участка минералообразования
pH	6,6	7,3
Eh	73	236
Электропроводность	1330	680
CO <sub>2</sub>	29	6
HCO <sub>3</sub>	101	104
NO <sub>3</sub>	0,5	3,7
SO <sub>4</sub>	481	178
F	21,7	8,2
Fe <sup>2</sup>	0,93	0,21
Fe <sup>3</sup>	7,59	0,31
Si	4,5	3,26
Ca	222,99	84,4
Mg	25,91	19,59
K	17,23	3,88
Na	20	22,75
Общая минерализация	900,724	434,56
Катионы	299,224	134,66
Анионы	611,5	299,9

А



100 mm

Б



80 mm

тометрии и ИК-спектрофотометрии в препаратах этого материала диагностированы водные сульфаты цинка с разным количеством кристаллогидратной воды: бойлеит  $(Zn, Mg)SO_4 \cdot 4H_2O$ , бианкит  $ZnSO_4 \cdot 6H_2O$  и госларит  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  [11]. Кроме того, на электронном микроскопе с большой долей вероятности установлен купрогосларит —  $(ZnCu)SO_4 \cdot 7H_2O$  и цинкмелантерит —  $ZnMgMnFe[SO_4]_2(OH) \cdot 7H_2O$ . Сульфаты цинка образуются на поверхности практически неокисленного пирита. С сульфатами цинка ассоциирует гипс, кристаллы которого часто имеют палочковидную форму.

В составе корок и натеков белесо-коричневого материала между бревнами эстакады около разрушенной старой обогатительной фабрики диагностированы калиевые квасцы  $KAl[SO_4]_2 \cdot 12H_2O$  — сростки мелких октаэдрических кристалликов; галотрихит  $FeAl_2[SO_4]_4 \cdot 22H_2O$  — спутано-волоконистые тонкоигльчатые желтоватые кристаллы; вилкоксит  $MgAl[F(SO_4)_2] \cdot 18H_2O$  — табличатые кристаллы (рис. 3, А).

В полотно хвостохранилища лежалых песков около склада сульфидного концентрата в луже, pH воды которой равно 2,7, содержание (в мг/л) сульфат-иона составляет 2214,41 трехвалентного железа — 231, урана — 214, тория — 1452. В чаше отстойника, расположенного в 200 м ниже по долине, куда стекает вода, промывающая сульфидный склад и лежалые пески старого хвостохранилища, содержание сульфата возрастает в два раза и составляет 4865,11 мг/л. Содержание (в мг/л) трехвалентного железа повышается незначительно — до 323, урана — до 535, тория — до 2210. Содержание же цинка увеличивается в отстойнике по сравнению с лужей у сульфидного склада в пять раз — от 108 до 523 мг/л. pH воды в отстойнике практически такая же, как в луже у сульфидного склада — 2,6. В таких условиях пирит ста-

**Рис. 3. Морфология кристаллов вилкоксит, месторождение Бом-Горхон (А) и галотрихита, месторождение Озерное (Б). Изображения получены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ)**

новится неустойчивым, железо мигрирует с водными потоками, но, как можно наблюдать визуально, на геохимических барьерах формируются не сульфаты железа, а окисные его формы. Концентрация цинка возрастает, и в ясную погоду на поверхности отстойника появляется белая пленка, вероятно, многоводных сульфатов цинка и других металлов, которая исчезает при повышении влажности атмосферы. Расшифровка дифрактограммы образца донных осадков отстойника, по данным О.В.Карначук, выявила присутствие в нем ряда минералов, образованных элементами, входящими в состав руд в незначительных количествах: торита —  $\text{ThSiO}_4$ , тюамунита —  $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2\text{V}_2\text{O}_8 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , умохоита —  $\text{UMoO}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , бернардита —  $\text{TlAs}_5\text{S}_8$ , лиандрадита —  $\text{UNb}_2\text{O}_8$  и др.

Исходя из модельных расчетов по данным экспериментов по кислотному выщелачиванию руд месторождения [4] установлено, что слабокислыми серными растворами наиболее активно выносятся такие элементы как цинк, медь, магний и кальций, что в природных условиях способствует их миграции из областей хранения продуктов горного производства в окружающие ландшафты.

**Холоднинское месторождение** колчеданно-полиметаллических руд, расположенное на севере Бурятии, открыто в 1968 г. при проведении геолого-геофизических работ. Изучение его начато в 1969 г., предварительная и детальная разведка велась в 1973—1984 гг. Месторождение приурочено к метаморфизованным углеродисто-терригенным флиш-идным комплексам пород. Выделены 3 стратиформные кулисообразно залегающие рудные зоны, промышленное оруденение в которых прослежено на расстоянии свыше 5 км. В пределах одной из зон выделяют три сближенные залежи пласто- и линзообразной формы, характеризующиеся перемежаемостью слоев колчеданно-полиметаллических, серно-колчеданных руд и слабоминерализованных пород. Главные рудные минералы: пирит, пирротин, сфалерит, галенит и халькопирит, второстепенные — арсенопирит, блёклые руды, магнетит, рутил, ильменит. Колчеданно-полиметаллические руды содержат промышленные концентрации свинца, цинка, серы и других ценных компонентов.  $\text{Pb}/\text{Zn}$  составляет 1/7. Проектируется комбинированная система разработки: карьером до глубины 200—300 м с последовательным переходом на подземную добычу. Технологическая схема обогащения предусматривает селективно-коллективную флотацию. Вследствие тонкозернистой структуры рудных минералов, их тесного взаимного срастания как между собой, так и с нерудными минералами, перед флотацией предусматривается весьма тонкое измельчение руды [6].

На месторождении находятся две разведочные штольни, при проходке которых не были отдельно складированы породный и рудный отвалы. Образовавшиеся смешанные отвалы пород и руд, оцененные

как техногенное месторождение, занимают площадь в несколько сотен квадратных метров. Рудничные воды одной из штолен, имеющие ярко-оранжевую окраску, вливаются в р.Холодная.

По всей площади штольневых отвалов наблюдается формирование гипергенных минералов в виде белых, желтых и коричневых образований, локализуемых на обломках полиметаллических руд в виде корочек, пленок, натёков.

Наибольшие по размерам скопления белых минеральных образований зафиксированы в откосе отвалов первой штольни. Они образуют массивные натечные формы и при высыхании осыпаются вниз по откосу. Химический анализ этих образований показал присутствие сульфатов магния, цинка кобальта. Рентгеноструктурный анализ позволил выявить в этих образцах старкиит  $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , госларит  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , эплоуита  $\text{CoSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Здесь вероятно присутствие сульфатов цинка и с другим количеством кристаллогидратной воды.

Минеральные новообразования желтого цвета обнаружены на нижней поверхности обломков горных пород во многих местах отвалов. Они образуют пористые натёки толщиной 2—3 мм. Встречаются ажурные кристаллические формы. Место их нахождения свидетельствует о высокой растворимости этих образований. Химический анализ их состава и рентгенография позволили установить в образцах магнийсодержащий копиаптит  $\text{MgFe}_4(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$ , пикерингит  $\text{MgAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ , галотрихит  $\text{FeAl}_2[\text{SO}_4]_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ , брандтит  $\text{Ca}_2\text{Mn}(\text{AsO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

Коричневые гипергенные образования найдены на удалении 10 м вниз по склону от отвалов штольни 2. Они образуют пятна размером 20—30 см на поверхности торфяников. Их формирование, вероятно, связано с потоком грунтовых вод, дренирующих отвалы, и происходит на испарительном барьере при сезонных понижениях уровня грунтовых вод и повышении их общей минерализации, концентрации в них химических элементов. В составе этих образований установлено повышенное содержание сульфат-иона, кальция, магния, цинка, кобальта. Расшифровка дифрактограмм выявила присутствие в них гипса, старкиита, госларита, эплоуита, то есть их состав оказался аналогичным составу белых минеральных агрегатов, формирующихся на отвалах штолен. Коричневый цвет может быть обусловлен захватом кристаллизующимся веществом частиц торфа.

Вышесказанное свидетельствует о том, что отвалы горных пород, складированные возле штолен, являются источником загрязнения поверхностных и подземных вод. В миграцию вовлечены такие токсичные элементы как цинк, кобальт, мышьяк, железо.

**Месторождение Озерное** расположено на Витимском плоскогорье на границе тайги и плоских котловин, занятых Еравнинскими озерами. Это слаборас-

члененная лесистая среднегорная территория с холмистым рельефом и абсолютными отметками — от 1100 до 1335 м. Гидросеть развита слабо. Многолетнемерзлые породы имеют сплошное распространение. Месторождение открыто в 1963 г., в 1969 г. завершена его детальная разведка. Главные рудные минералы — пирит и сфалерит, галенит менее распространены. Второстепенные — магнетит, гематит, арсенипирит, халькопирит, блёклые руды, минералы серебра. Основная масса руд тонкозернистая и скрытокристаллическая. Характерно тонкое срастание сульфидов между собой. Мощность зоны окисления от 5 до 50 м. В составе окисленных руд преобладают гидроксиды железа. Свинец и цинк представлены плюмбозитом, смитсонитом, церусситом, англезитом и пироморфитом. Разработка месторождения планируется открытым способом [5].

Современное минералообразование на площади, где велись разведочные работы, проявлено широко. Дренажное таликовыми и поверхностными водами отвалов горных выработок приводит к повышению в этих водах концентрации серы, свинца, цинка и других металлов. При понижении уровня вод на больших территориях происходит кристаллизация гидросульфатов этих элементов. Кристаллы новообразований обрастают траву, старые пни, ветки и растительные остатки, лежащие на земле. При выпадении атмосферных осадков или повышении уровня грунтовых вод по этой или другим причинам, новообразованные минералы растворяются, и миграция потенциально токсичных химических элементов вниз по водотокам продолжается.

При разведке месторождения пройдена штольня, отвалы которой, образованные обломками вмещающих горных пород и руд, расположены на правобережье ручья Левый Сурхебт. Часть отвалов пород вывезена на отсыпку дорог и можно предполагать, что в местах отсыпки также протекают процессы их экзогенного преобразования. Близкое залегание грунтовых вод в районе штольни благоприятствует повышению в них концентрации рудных компонентов в результате частичного выпаривания и формирования на испарительном барьере новообразованных минералов, среди которых рентгеноструктурным и электронно-микроскопическим анализом диагностирован бойлеит, образующий на мелких обломках горных пород прозрачные бесцветные и желтоватые кристаллы. На остатках древесной растительности обнаружены многочисленные зеленоватые игольчатые новообразования галотрихита (см. рис. 3, В), в котором, по сравнению со справочным составом, повышено содержание цинка до 2,5%. В ассоциации с галотрихитом постоянно присутствует гипс.

Другой тип новообразований связан с инфильтрацией растворов через отвалы штольни. В обнажении штольневых отвалов обнаружены новообразования белого цвета, которые занимают площадь около 3 м<sup>2</sup>.

Новообразования имеют натечную форму, толщина корки 1,5—2,0 см. С поверхности они пористые, на глубине становятся плотными. Дифрактограмма образца показала, что они представлены бойлеитом.

На удалении 70 м от отвалов штольни вниз по правому берегу ручья Левый Сурхебт обнаружено поле выцветов солей площадью в несколько десятков квадратных метров. Они представлены мелкими прозрачными кристаллами, обрастающими мхи, лишайники, мелкие ветки, покрывающими почву. Их образование, вероятно, связано с разгрузкой грунтового потока, расположенного близко к поверхности, вытекающего из-под отвалов штольни и впадающего в ручей. Большинство новообразований представлено гипсом. Химический состав отдельных образцов позволяет диагностировать минералы как кристаллогидраты сульфатов железа и цинка, которые могут легко растворяться и мигрировать в поверхностных и грунтовых водах.

Представленный материал позволяет сделать следующие выводы:

1. На всех изученных месторождениях современное минералообразование связано с геотехногенезом. Среди диагностированных минералов подавляющее большинство — это водные сульфаты, процессы образования которых обусловлены окислением под воздействием атмосферного кислорода и воды сульфидов руд, вскрышных пород, вынутых на дневную поверхность при разведке месторождений, сульфидов, оставшихся в хвостохранилищах.

2. Среди новообразований преобладают сульфаты с большим количеством кристаллогидратной воды. Как показал В.Н.Авдонин [1], маловодные сульфаты цинка достаточно редки и их образование зависит от температуры и влажности среды — чем выше температура, тем больше возможности для кристаллизации ганнингита, а не бойлеита или госларита. Госларит же, установленный авторами на Холоднинском месторождении (зона многолетнемерзлых пород), образуется не только при обычных температурах, но и в условиях криолитозоны [10].

3. Судя по набору минералов, образующихся в месторождениях, их природно-техногенные системы находятся на кульминационной стадии развития [3], характеризующейся массовым образованием водных сульфатов с максимально возможной в данных условиях растворимостью. Важно, что именно на этой стадии они выступают как концентраторы потенциально токсичных элементов, в том числе находящихся в природных рудах в мизерных количествах.

Таким образом, на примере Бом-Горхонской и Джидинской геотехногенных систем, Холоднинского и Озерного месторождений, подготовленных к эксплуатации, можно наблюдать миграцию потенциально токсичных тяжелых металлов в виде растворимых соединений из хвостохранилищ и отвалов вскрышных пород и других мест складирования от-

ходов горнорудной промышленности, временное концентрирование их в виде сульфатов, алюмофторидов и других неустойчивых минералов на природных геохимических барьерах. Знание механизмов и условий миграции и концентрирования потенциально токсичных элементов в горнорудных районах может быть использовано при разработке программ мероприятий по защите окружающей среды и рекультивации территорий, занятых отходами обогащения сульфидсодержащих руд.

*Авторы благодарны С.В.Канакину за помощь в изучении состава и морфологии минералов на сканирующем электронном микроскопе. Исследования поддержаны РФФИ — грант № 13-05-01155.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдонин В.Н. Техногенное окисление сульфидов Красногвардейского месторождения на Урале // *Материалы по минералогии месторождений Урала*. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. С. 63—69.
2. Агеев Н.А., Корчагин У.А. Структурные условия локализации вольфрамового оруденения на Бом-Горхонском месторождении (Западное Забайкалье) // *Минералогия и геохимия вольфрамовых месторождений / Тр. III Всесоюзного совещания по минералогии, геохимии, генезису и комплексному использованию вольфрамовых месторождений СССР*. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1975. С. 21—27.
3. Белогуб Е.В., Щербакова Е.П., Никандрова Н.К. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. — М.: Наука, 2007.
4. Еремин О.В., Эпова Е.С., Смирнова О.К., Юргенсон Г.А. Экспериментальное и теоретическое изучение взаимодействий воды с породами и рудами вольфрамового месторождения Бом-Горхон (Забайкалье) // *Современные проблемы геохимии. / Мат-лы Всероссийского совещания*. Т. 3. — Иркутск, 2012. С. 202—206.
5. Кислов Е.В., Плюснин А.М. Экологические проблемы освоения свинцово-цинкового месторождения Озерное (Западное Забайкалье) // *География и природные ресурсы*. 2009. № 2. С. 37—43.
6. Кислов Е.В., Плюснин А.М. Проблемы освоения Холодинского свинцово-цинкового месторождения (Северное Прибайкалье) // *География и природные ресурсы*. 2009. № 4. С. 33—39.
7. Михеев В.И. Рентгенометрический определитель минералов. — М.: Наука, 1957.
8. Онтоев Д.О. Стадийность минерализации и зональность месторождений Забайкалья. — М.: Наука, 1974.
9. Повилайтис М.М. Основные черты минералогии Джидинского молибдено-вольфрамового месторождения. — М., 1960.
10. Сергутская О.С., Юргенсон Г.А., Никитин Д.А., Смирнова О.К. Новообразованные сульфаты цинка как критерий состояния геологической среды // *Проблемы геологической и минерагенической корреляции в сопредельных районах России, Китая и Монголии / Тр. IX международного симпозиума*. — Чита, 2011. С. 92—98.
11. Смирнова О.К., Саратулова А.Е., Цыренова А.А. Особенности нахождения тяжелых металлов в геотехногенных ландшафтах Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // *Геозкология*. 2010. № 4. С. 319—327.
12. Юргенсон Г.А., Смирнова О.К., Меркулов Е.Б. Современное минералообразование в природно-техногенной системе Барун-Нарынского хранилища отходов обогащательного производства Джидинского вольфрамо-молибденового комбината // *Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование / Тр. II Всероссийского симпозиума с международным участием*. — Чита, 2008. С. 138—143.
13. Юргенсон Г.А., Смирнова О.К., Филенко Р.А. Современное минералообразование в геотехногенных ландшафтах как индикатор состояния природной среды // *Проблемы геологии, минеральных ресурсов и геозкологии Западного Забайкалья / Мат-лы международной конференции, посвященной 50-летию Бурятского геологического управления*. — Улан-Удэ: Изд-во: БНЦ СО РАН, 2007. С. 156—158.
14. Яхонтова Л. К., Зверева В. П. Минералы зоны гипергенеза. — Владивосток: Дальнаука, 2007.
15. Gotzinger M.A., Beran A., Libowitzky E. Mineralvorkommen und lagerstätten im östlichen Waldviertel // *Miner. Ges.* 1994. Vol. 139. Pp. 399—405.
16. Jambor J.L., Trail D.I. On rozenite and siderotil // *Canadian Mineralogist*. 1963. Vol. 7. Pp. 751—763.
17. Tessier A., Campbell P. G., Bisson M. // *Anal Chem*. 1979. Vol. 51. № 7.