

УДК 549: 553.044

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЕЖАЛЫХ ПЕСКОВ ХВОСТОХРАНИЛИЩ СОЛНЕЧНОГО ГОКА (КОМСОМОЛЬСКИЙ РАЙОН, ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

©2012 А.И. Ханчук¹, Р.А. Кемкина², И.В. Кемкин^{1,2}, В.П. Зверева^{1,2}

¹Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022;
e-mail: kemkin@fegi.ru

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690090

В статье приводится минералого-геохимическая характеристика первичных руд оловянных месторождений Комсомольского района (Хабаровский край), дезинтегрированные фрагменты которых составляют продуктивную часть лежалых песков хвостохранилищ Солнечного горно-обогатительного комбината. На основе данных по химическому составу рудных минералов и содержанию их в отвальных хвостах осуществлен подсчет прогнозных запасов экономически важных металлов. Учитывая то, что отходы переработки руд находятся на поверхности земли и горная масса в них уже дезинтегрирована, хвостохранилища горно-обогатительных фабрик Центральной и Солнечной следует рассматривать как дополнительный и относительно дешевый источник минерального сырья.

Ключевые слова: хвостохранилища, техногенные месторождения, рудные минералы.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие экономики диктует постоянный и всевозрастающий рост потребления природного минерального сырья, в связи с чем, начиная со второй половины XX века, в России и мире очень быстрыми темпами происходило масштабное развитие горной промышленности. Однако, доступные запасы минерального сырья неуклонно уменьшаются. Сегодня на многих горнодобывающих предприятиях, особенно в давно освоенных горнорудных районах, обеспеченность разведанными запасами достигла крайне низкого уровня, а резерв запасов многих видов полезных ископаемых на эксплуатируемых месторождениях недостаточен (Комаров и др., 2007). При современном уровне добычи запасов, например, цинка осталось на 25-30 лет, а свинца на 50-60 лет (Ломакин, 2007; Романова и др., 2006). Положение усугубляется еще и тем, что по большинству видов полезных ископаемых происходит существенное свертывание геолого-разведочных работ. Кроме того, минеральное сырье, извлекаемое из недр, в связи с добычей его на все более значительных глубинах в сложных горно-геологических условиях постоянно до-

рожает. Стоимость сырья растет каждый год на 5-10 и более процентов, несмотря на внедрение новой техники и автоматизацию некоторых производств.

Вместе с тем, вековое развитие горной промышленности привело к накоплению гигантских объемов (только в России около 80 млрд. т) отходов горнорудного производства – хвостов (Калинин, 2008). Хвостохранилища, по сути, являются техногенными месторождениями (Горная..., 1991; Макаров, 2000; Трубецкой и др., 1989 и др.) с существенными запасами в промышленных содержаниях широкого спектра полезных компонентов – Sn, Cu, Pb, Zn, Cd, In, Bi, Au, Ag и др. (десятки тысяч тонн каждого). С этих позиций их следует рассматривать как дополнительный и относительно дешевый источник минерального сырья. Они расположены в промышленно развитых районах, находятся на поверхности земли и горная масса в них преимущественно дезинтегрирована, что резко снижает затраты на их разработку. Актуальность повторной переработки рудной массы из хвостохранилищ очевидна, поскольку их разработка позволяет одновременно решать целый ряд как экономических, так и социальных и экологических проблем.

Следует подчеркнуть, что экологические проблемы имеют особую важность, так как складирование отходов горнодобывающих и обогатительных предприятий исключает из хозяйственного оборота большие площади земель, снижает их качество из-за пылевых заносов с отвалов и хвостохранилищ. Происходит загрязнение окружающей среды (атмосферы, поверхностных и подземных вод, почв, растительности и живых организмов, включая человека) тяжёлыми металлами и их солями, концентрация которых в сотни и тысячи раз превышает фоновые значения и предельно допустимые нормы. В результате процессов гипергенеза (окисление, растворение, гидролиз и др.) весь спектр химических элементов минеральных групп в хвостохранилищах, представленных в большинстве случаев сульфидами, теллуридами, селенидами, сульфосолями различных металлов преобразуется в другие минеральные формы и водные растворы и самопроизвольно мигрирует в атмо-, лито-, био- и гидросферу (Зверева, 2005; Кемкина, Кемкин, 2007; Крупская, 1998; Сотников, 1997; Тарасенко, Зиньков, 2001 и др.). Следовательно, проблема переработки хвостохранилищ, по нашему мнению, является одной из актуальнейших на ближайшую перспективу как в экономическом, так и экологическом аспектах.

Одним из дополнительных и относительно дешёвых источников минерального сырья авторы считают хвостохранилища Солнечного горно-обогатительного комбината (ГОКа), для которых на основе минералого-геохимических исследований рудных минералов определены прогнозные количества как основных металлов, так и редких элементов. Результаты этих исследований приводятся в настоящей работе.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА

Горная промышленность в Комсомольском районе (Хабаровский край) развивается уже более 60 лет. Ее основа — оловянные, медно-оловянные и олово-полиметаллические месторождения, отработка которых осуществлялась как открытым (карьеры), так и подземным (штольни) способами. Обогащение руд проводилось на двух горно-обогатительных фабриках: Солнечной (СОФ) и Центральной (ЦОФ), где из добываемой руды получали концентрат на Sn, Cu, Pb и Zn. Отходы отработанной руды (хвосты) складировались рядом с горно-обогатительными фабриками на трех хвостохранилищах (рис. 1). В настоящее время хвосты на первом (СОФ) и втором (ЦОФ) хвостохранилищах находятся в сухом виде, а третье хвостохранилище, куда с ЦОФ сбрасы-

вается пульпа от периодически возобновляемой переработки руд месторождения Фестивальное, закрыто сверху шламовыми водами.

На хвостохранилище СОФ складированы отходы обогащения руд месторождений Солнечное (70% от общего объема), Перевальное (20%) и Придорожное (10%), которые накапливались с 1963 по 1984 гг. Площадь его 20 га, мощность отвальных хвостов 20–25 м, а объем — 10.6 млн. т. Второе хвостохранилище ЦОФ занимает 40.3 га, а его объем 24.09 млн. т. Здесь с 1965 по 2001 гг. накапливались отходы переработки руд месторождений Фестивальное (75%), Перевальное (20%) и Придорожное (5%).

Изучение вещественного содержимого хвостохранилищ, выполненное как по собственным материалам, так и данным исследования керна скважин (Василенко и др., 1989¹), пробуренных на хвостохранилищах Солнечным ГОКом, показало, что сложены они намывными осадками песчаной и алевроитовой размерности. В верхних частях хвостохранилищ техногенные отложения имеют рыхлую консистенцию, но вниз по разрезу они часто спрессованы. Соотношение песчаных и алевроитовых частиц составляет в среднем 70:30%. Размерность песчаных частиц, как правило, < 0.5 мм. При этом на фракцию от 0.1 до 0.5 мм приходится 65–85%, а фракция менее 0.1 мм составляет 15–35%. В вертикальном разрезе распределение песков по крупности зерен неравномерно.

В составе отвальных хвостов преобладают обломки вмещающих рудные тела ороговикованных терригенных пород, кварца и турмалина, количество которых составляет 93% для СОФ и 95% для ЦОФ. На долю сульфидов в лежалых песках СОФ приходится 5.22%. В незначительном количестве присутствуют касситерит, вольфрамит, шеелит, а также магнетит, куприт, лимонит, карбонаты и слюды, составляющие 1.78%. Содержания конкретных рудных минералов приведены в табл. 1. Содержание нерудных минералов (кварца и турмалина), а также ороговикованных пород составляет, соответственно, 35, 10 и 48%.

Сумма сульфидов и других рудных минералов в песках хвостохранилища ЦОФ составляет 5% (табл. 2). Содержание нерудных минералов следующее: ороговикованные породы — 45%, кварц — 37%, турмалин — 13%.

Степень окисленности рудных минералов незначительна. В частности, отмечается замещение халькопирита ковеллином и халькозином. Под микроскопом видны каемки ковеллина с халькозином на поверхности зерен халькопирита.

¹ Василенко Г.П., Петраченко Е.Д., Школьник Э.Л. и др. Промежуточный отчет по результатам исследований по Программе ГКНТ СМ СССР РИМС за I квартал. Владивосток, 1989. 87 с.

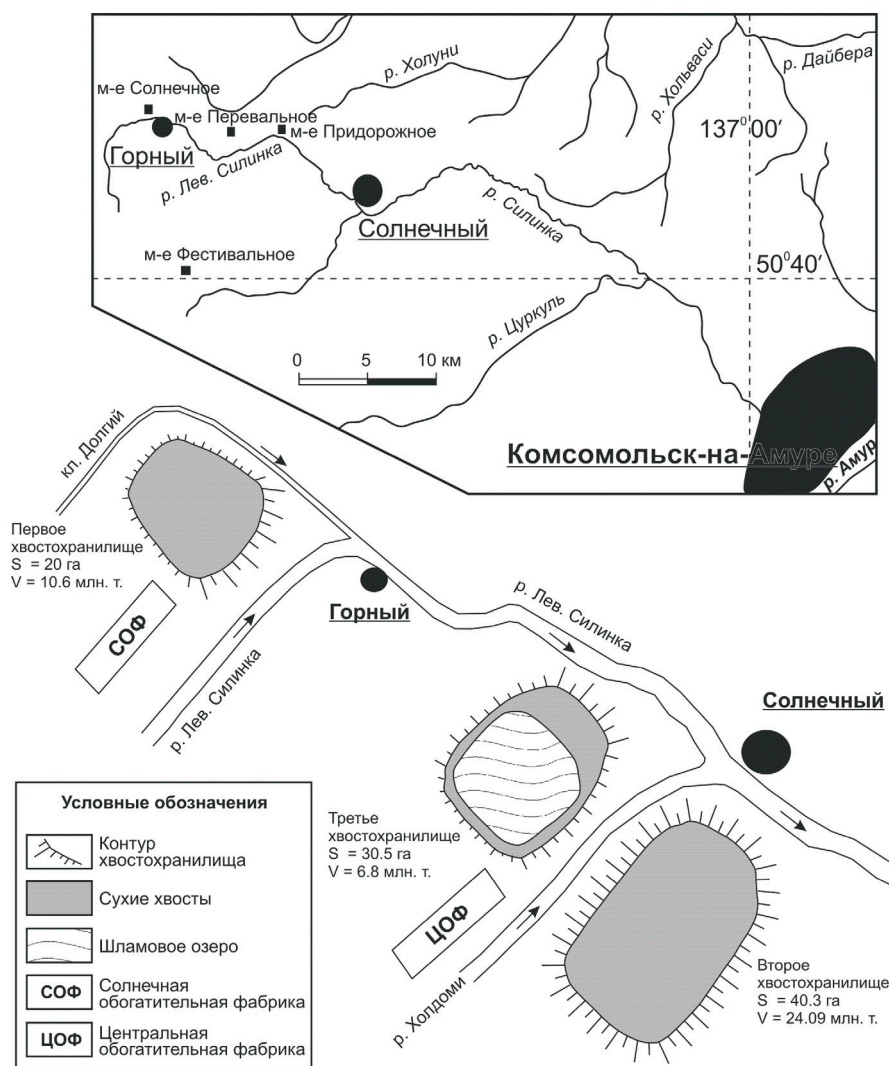


Рис. 1. Схема расположения объектов Солнечного ГОКа.

Наиболее подвержен окислению пирротин, с образованием структур типа «птичьего глаза» с включениями вторичных минералов марказита и пирита. Последние занимают до 20-30% от всего объема пирротина. Однако, подобные замещения халькопирита и пирротина наблюдаются и в первичных рудах, не прошедших стадии добычи, переработки и последующего складирования на хвостохранилищах, что говорит о том, что процессам окисления рудные минералы подверглись еще будучи в составе рудных тел, а не в хвостохранилище. Редко встречающиеся галенит и сфалерит обычно имеют незамутненные поверхности.

Касситерит в лежалых песках присутствует как в виде самостоятельных зерен, так и в сростках. В аншлифах видно, что преобладают сростания его с кварцем, в меньшей мере с турмалином, в котором наблюдаются тонкие прожилки размером 0.02 мм, а также с сульфидами. Среди последних встречается станнин, образующий каемки вокруг зерен касситерита. Размер кристаллов касситерита, как в свободных

зернах, так и в сростках не превышает сотые доли мм (обычно от 0.01 до 0.03-0.05 мм).

Халькопирит – второй по промышленной значимости минерал лежалых песков. Около 70% его находится в сростках с пирротинном, пиритом, сфалеритом, арсенопиритом, иногда станнином и блеклой рудой. Наиболее часты его сростания с пирротинном. Встречаются сростки с кварцем и турмалином (10-15% всего халькопирита). Свободные зерна этого минерала или мономинеральные агрегаты составляют также 10-15% всего халькопирита. В этом случае его размеры составляют тысячные и сотые доли мм. Размеры же его в сростках более крупные – до первых десятых долей мм.

Вольфрамит встречается в сростках с кварцем, пирротинном и халькопиритом. Размер его зерен варьирует в пределах 0.005-0.1 мм, но обычно составляет 0.01-0.09 мм. Сфалерит, галенит и станнин встречаются редко и в очень малых количествах, 0.15, 0.04 и 0.04% соответственно. Обычно они образуют сростки с халькопиритом, пирротинном и другими сульфидами. Размеры

МИНЕРАЛОГ-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Таблица 1. Состав и количество рудных минералов в лежалых песках хвостохранилища СОФ и прогнозные запасы металлов.

Название	Минерал		Элемент											
	Содержание в хвостах, %	Запасы в хвостах, тонны	W		Mn		Fe		Sn		S			
			% в мигнерале	тонны в хвостах	% в мигнерале	тонны в хвостах	% в мигнерале	тонны в хвостах	% в мигнерале	тонны в хвостах	% в мигнерале	тонны в хвостах		
Вольфрамит	0.06	6240	75.28	4697.5	10.5	655.2	13.72	856.1	0.5	31.2	-	-		
Арсенопирит	1.3	135200	-	-	-	-	33.98	45941.0	-	-	19.75	26702		
Пирротин	1.13	117520	-	-	-	-	58.27	68478.9	-	-	41.1	48300.7		
Пирит	0.82	85280	-	-	-	-	45.05	38418.6	-	-	52.25	44558.8		
Сфалерит	0.15	15600	-	-	0.52	81.1	12.21	1904.8	-	-	33.97	5299.3		
Халькопирит	1.1	114400	-	-	-	-	32.54	37225.8	-	-	34.55	39525.2		
Галенит	0.04	4160	-	-	0.029	1.21	0.79	32.9	-	-	14.01	582.8		
Станнин	0.04	4160	-	-	-	-	13.41	557.9	27.8	1156.5	27.54	1145.7		
Касситерит	0.23	23920	-	-	-	-	1.96	468.8	97.7	23369.8	-	-		
Джемсонит-буланжерит	0.21	21840	-	-	-	-	2.42	528.5	-	-	21.59	4715.3		
Блеклая руда	0.09	9360	-	-	-	-	-	-	-	-	24.09	2254.8		
Шеелит	0.05	5200	80.21	4170.9	0.14	7.28	0.15	7.8	-	-	-	-		
Бурнонит	0.05	5200	-	-	-	-	2.53	131.6	-	-	18.57	965.6		
Тиллит	0.02	2080	-	-	-	-	0.01	0.26	30.51	634.7	16.32	339.5		
Висмутин	0.05	5200	-	-	-	-	1.23	63.9	-	-	19.9	1034.8		
Кубанит	0.03	3120	-	-	-	-	41.26	1287.3	-	-	35.3	1101.4		
Валлериит	0.06	6240	-	-	-	-	36.08	2251.4	-	-	41.15	2567.8		
Айкинит	0.08	8320	-	-	-	-	0.05	4.2	-	-	16.92	1407.7		
Кобальтин	0.05	5200	-	-	-	-	1.13	58.8	-	-	18.5	962		
Магнетит	0.05	5200	-	-	-	-	72.4	3764.8	-	-	-	-		
Куприт	0.14	14560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Малахит	0.1	10400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Лимонит	0.5	52000	-	-	-	-	62.9	32719.12	-	-	-	-		
Итого	-	660400	-	8868.4	-	744.8	-	234702.3	-	25192.1	-	181463.4		

Таблица 1. Продолжение

Минерал	Элемент											
	As		Pb		Zn		Bi		Sb		Ni	
Название	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах
Вольфрамит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Арсенопирит	45.01	60853.5	0.15	202.8	-	-	0.23	311.0	0.48	649.0	0.06	81.1
Пирротин	0.24	282.0	0.18	211.5	-	-	0.006	7.1	0.005	5.9	0.019	22.3
Пирит	2.28	1944.4	-	-	-	-	0.035	29.8	0.06	51.2	0.28	238.8
Сфалерит	-	-	0.04	6.2	52.13	8132.3	-	-	-	-	-	-
Халькопирит	0.32	366.1	0.285	326.0	-	-	0.298	340.9	0.144	164.7	0.01	11.4
Галенит	0.22	9.2	82.61	3436.6	0.7	29.1	0.78	32.5	0.49	20.4	-	-
Станнин	0.04	1.7	-	-	3.08	128.1	-	-	-	-	-	-
Касситерит	0.1	23.9	0.67	160.3	-	-	-	-	0.05	11.9	-	-
Джемсонит-буланжерит	0.05	10.9	40.16	8770.9	0.061	13.3	0.64	139.8	35.01	7646.1	-	-
Блеклая руда	4.02	376.3	0.24	22.5	-	-	0.73	68.3	25.2	2358.7	-	-
Шеелит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Бурнонит	0.025	1.3	41.14	2139.3	0.045	2.3	-	-	24.65	1281.8	-	-
Тиллит	-	-	52.05	1082.6	0.21	4.4	-	-	-	-	-	-
Висмутин	-	-	-	-	-	-	77.97	4054.4	-	-	-	-
Кубанит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	1.6
Валлерит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	1.2
Айкинит	-	-	36.11	3004.3	-	-	36.15	3007.7	-	-	-	-
Кобальтин	45.11	2345.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18	-
Магнетит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Куприт	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Малахит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Лимонит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Итого	-	66214.9	-	19363.1	-	8309.6	-	7991.4	-	12189.8	-	356.5

Таблица 1. Окончание

Минерал	Элемент											
	Co		Cu		In		Ag		Sc		Ga	
	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах
Вольфрамит	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.0624	-	-
Арсенопирит	0.17	229.8	0.17	229.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Пирротин	0.03	35.3	0.15	176.3	-	-	-	-	-	-	-	-
Пирит	0.044	37.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сфалерит	-	-	0.71	110.8	0.11	17.2	-	-	-	-	-	-
Халькопирит	-	-	31.8	36379.2	0.022	25.2	0.03	34.3	-	-	0.0009	1.0
Галенит	-	-	-	-	-	-	0.37	15.4	-	-	-	-0
Станнин	-	-	28.13	1170.2	-	-	-	-	-	-	-	0-
Касситерит	-	-	0.1	23.9	0.002	0.5	0.003	0.7	0.003	0.7176	0.002	0.5
Джемсонит-буланжерит	-	-	0.049	10.7	-	-	0.02	4.4	-	-	-	-
Блеклая руда	-	-	45.72	4279.4	-	-	-	-	-	-	-	-
Шеелит	-	-	0.005	0.3	0.003	0.2	-	-	-	-	-	-
Бурнонит	-	-	13.04	678.1	-	-	-	-	-	-	-	-
Тиллит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Висмутин	-	-	0.85	44.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Кубанит	0.02	0.6	23.37	729.1	-	-	-	-	-	-	-	-
Валлерийит	-	-	22.75	1419.6	-	-	-	-	-	-	-	-
Айкинит	-	-	10.95	911.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Кобальтин	32.13	1670.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Магнетит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Куприт	-	-	88.8	12890.2	-	-	-	-	-	-	-	-
Малахит	-	-	56.0	5824	-	-	-	-	-	-	-	-
Лимонит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Итого	-	1974.0	-	64876.8	-	43.0	-	54.8	-	0.78	-	1.5

Примечание: В колонках «% в минерале» - усредненные содержания элементов. Прочерк – значения ниже предела чувствительности метода анализа.

Таблица 2. Состав и количество рудных минералов в лежалых песках хвостохранилища ЦОФ и прогнозные запасы металлов.

Название	Минерал	Запасы в хвостах, тонны	Элемент											
			W		Mn		Fe		Sn		S			
			% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах		
Вольфрамит	0.11	26499	75.28	19948.2	10.5	2782.4	13.72	3635.7	0.5	132.5	-	-	-	
Арсенопирит	0.57	137313	-	-	-	-	33.98	46659.0	-	-	19.75	27119.3	-	
Пирротин	0.84	202356	-	-	-	-	58.27	117912.8	-	-	41.10	83168.3	-	
Пирит	1.2	289080	-	-	-	-	45.05	130230.5	-	-	52.25	151044.3	-	
Сфалерит	0.4	96360	-	-	0.52	501.1	12.21	11765.6	-	-	33.97	32733.5	-	
Халькопирит	0.35	84315	-	-	-	-	32.54	27436.1	-	-	34.55	29130.8	-	
Галенит	0.4	96360	-	-	0.029	27.9	0.79	761.2	-	-	14.01	13500.0	-	
Станнин	0.03	7227	-	-	-	-	13.41	969.1	27.80	2009.1	27.54	1990.3	-	
Касситерит	0.15	36135	-	-	-	-	1.96	708.2	97.7	35307.5	-	-	-	
Джемсонит-буланжерит	0.21	50589	-	-	-	-	2.42	1224.3	-	-	21.59	10922.2	-	
Блеклая руда	0.16	38544	-	-	-	-	-	-	-	-	24.09	9285.3	-	
Шеелит	0.1	24090	80.21	19274.4	0.14	33.7	0.15	36.1	-	-	-	-	-	
Бурнонит	0.05	12045	-	-	-	-	2.53	304.7	-	-	18.57	2236.8	-	
Тиллит	0.09	21681	-	-	-	-	0.01	2.2	30.51	6614.9	16.32	3538.3	-	
Висмутин	0.09	21681	-	-	-	-	1.23	277.5	-	-	19.90	4314.5	-	
Кубанит	0.06	14454	-	-	-	-	41.26	5963.7	-	-	35.30	5102.2	-	
Валлерит	0.06	14454	-	-	-	-	36.08	5215.0	-	-	41.15	5947.8	-	
Айкинит	0.08	19272	-	-	-	-	0.05	9.6	-	-	16.92	3241.6	-	
Кобальпин	0.05	12045	-	-	-	-	1.13	136.1	-	-	18.50	2354.8	-	
Итого	-	1204500	-	39222.6	-	3345.1	-	353247.5	-	44064.0	-	385630.1	-	

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Таблица 2. Продолжение

Минерал	Элемент											
	As		Pb		Zn		Bi		Sb		Ni	
Название	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах
Вольфрамит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Арсенопирит	45.01	61804.6	0.15	206.0	-	-	0.23	315.8	0.48	659.1	0.06	82.4
Пирротин	0.24	485.7	0.18	364.2	-	-	0.006	12.1	0.005	10.1	0.019	38.5
Пирит	2.28	6591.0	-	-	-	-	0.035	101.2	0.06	173.5	0.28	809.4
Сфалерит	-	-	0.04	38.5	52.13	50232.5	-	-	-	-	-	-
Халькопирит	0.32	269.8	0.285	240.3	-	-	0.298	251.3	0.144	121.4	0.01	8.4
Галенит	0.22	212.0	82.61	79603	0.70	674.5	0.78	751.6	0.49	472.2	-	-
Станнин	0.04	2.9	-	-	3.08	222.66	-	-	-	-	-	-
Касситерит	0.1	36.1	0.67	24.2	-	-	-	-	0.05	18.1	-	-
Джемсонит-буланжерит	0.05	25.3	40.16	20316.5	0.061	30.9	0.64	323.8	35.01	17711.2	-	-
Блеклая руда	4.02	1549.5	0.24	92.5	-	-	0.73	281.4	25.20	9713.1	-	-
Шеелит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Бурнонит	0.025	3.0	41.14	4955.3	0.045	5.4	-	-	24.65	2969.1	-	-
Тиллит	-	-	52.05	11480.1	0.21	45.5	-	-	-	-	-	-
Висмутин	-	-	-	-	-	-	77.97	16904.7	-	-	-	-
Кубанит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	7.2
Валлерит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	2.9
Айкинит	-	-	36.11	6959.1	-	-	36.15	6951.4	-	-	-	-
Кобальпин	45.11	5445.6	-	-	-	-	-	-	-	-	0.18	21.7
Итого	-	76425.4	-	124279.8	-	51211.4	-	25893.2	-	31847.7	-	970.5

Таблица 2. Окончание

Минерал	Элемент													
	Co		Cu		In		Ag		Sc		Ga			
Название	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах	% в ми-нерале	тонны в хвостах		
Вольфрамит	-	-	-	-	-	-	-	-	0.001	0.3	-	-		
Арсенопирит	0.17	233.4	0.17	233.4	-	-	-	-	-	-	-	-		
Пирротин	0.03	60.7	0.15	303.5	-	-	-	-	-	-	-	-		
Пирит	0.044	129.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Сфалерит	-	-	0.71	684.2	0.11	106.0	-	-	-	-	-	-		
Халькопирит	-	-	31.80	26812.2	0.022	18.5	0.03	25.3	-	-	0.0009	0.8		
Галенит	-	-	-	-	-	-	0.37	356.5	-	-	-	-		
Станнин	-	-	28.13	2033.0	-	-	-	-	-	-	-	-		
Касситерит	-	-	0.1	36.1	0.002	0.7	0.003	1.1	0.003	1.1	0.002	0.7		
Джемсонит-буланжерит	-	-	0.049	24.8	-	-	0.02	10.1	-	-	-	-		
Блеклая руда	-	-	45.72	17622.3	-	-	-	-	-	-	-	-		
Шеелит	-	-	0.005	1.2	0.003	0.7	-	-	-	-	-	-		
Бурнонит	-	-	13.04	1570.7	-	-	-	-	-	-	-	-		
Тиллит	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Висмутин	-	-	0.85	184.3	-	-	-	-	-	-	-	-		
Кубанит	0.02	2.9	23.37	3377.9	-	-	-	-	-	-	-	-		
Валлерит	-	-	22.75	3288.3	-	-	-	-	-	-	-	-		
Айкинит	-	-	10.95	2110.3	-	-	-	-	-	-	-	-		
Кобальпин	32.13	4086.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Итого	-	4513.4	-	58282.1	-	126.0	-	393.0	-	1.3	-	1.5		

Примечание: В колонках «% в минерале» - усредненные содержания элементов. Проверк – значения ниже предела чувствительности метода анализа.

их зерен составляют обычно сотые и тысячные, редко десятые доли мм.

Согласно данным Солнечного ГОКа (Василенко и др., 1989) при обогащении руд методом гравитационно-флотационной сепарации в конечный продукт при извлечении трех-четырёх полезных компонентов уходило всего до 20% от добытой рудной массы (т.е. кварц-турмалиновые метасоматиты с рудной минерализацией). Большая же часть рудного вещества, со значительными концентрациями как профилирующих для данного рудного района, так и попутных ценных металлов, сбрасывалась в хвостохранилища. В результате технологических операций (дробление, измельчение, флотация) первичные минеральные ассоциации и парагенезисы дезинтегрировались и рассеивались по всей массе отходов обогащения руд, сбрасываемых в хвостохранилища. Это, в свою очередь, создало определенные сложности обнаружения и идентификации рудных минералов и их количеств, при изучении минералогического состава лежалых песков, особенно тех, которые имели или приобрели тонкодисперсную размерность, а также тех, которые присутствовали в других минералах в виде субмикроскопических включений или мельчайшей эмульсионной вкрапленности и мирмекитовых срастаний. Естественно, чтобы получить полное представление о минеральном составе рудной части хвостохранилищ необходимо располагать детальной информацией о вещественном составе руд обрабатываемых месторождений. Эти данные, полученные в ходе собственных исследований, а также на основе анализа литературных источников (Геология ..., 1971; Минерализованные ..., 1967; Гоневчук, Гоневчук, 2008 и др.), приводятся далее.

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРВИЧНЫХ РУД КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА

Как отмечалось ранее, на хвостохранилищах СОФ и ЦОФ складированы продукты переработки руд месторождений Солнечное, Перевальное, Фестивальное и Придорожное. Для этих месторождений выделены следующие минеральные ассоциации, отражающие стадии процесса минералообразования (Геология ..., 1971): 1 – кварц-турмалиновая (дорудная), 2 – кварц-касситеритовая, 3 – кварц-касситерит-сульфидная, 4 – кварц-карбонатно-сульфидная, 5 – кальцит-пиритовая (послерудная). В пределах рудных тел наиболее широко развиты первые три ассоциации, слагающие жилы мощностью до 1 м. Две последние проявлены слабо и представлены маломощными (0,5-5 см) прожилками, секущими ранние жилы.

Основная промышленная минерализация

рассматриваемого района связана с кварц-касситеритовой ассоциацией. Главными рудными минералами этой ассоциации являются касситерит, арсенопирит, вольфрамит и шеелит. Кварц-касситерит-сульфидная ассоциация представлена касситеритом, пирротинном, арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, сульфосолями свинца и меди, станнином и др. В кварц-карбонатно-сульфидной ассоциации рудные минералы – галенит и сфалерит, а в кальцит-пиритовой – пирит. Приведем краткое описание главных рудных минералов.

Касситерит (SnO_2) на месторождениях Комсомольского района является главным промышленным минералом, где его содержание достигает 20-25%. Он отлагался на всем протяжении кристаллизации кварц-касситеритовой и кварц-касситерит-сульфидной стадий минералообразования. На это указывают и разная морфология его кристаллов (аллотриоморфные, игольчатые и пластинчатые выделения), и особенности внутреннего строения (наличие или отсутствие зон роста, включений), и присутствие его в разных парагенетических ассоциациях, и широкие вариации в размере зерен. При косом освещении отмечается зональная окраска зерен (центральная часть имеет густой коричневый цвет, а периферические части окрашены в более светлые тона). Подобная зональность позволяет предполагать, что процесс отложения касситерита был прерывистым, а условия его отложения многократно менялись. Выделяется две генерации касситерита. Для первой характерны изометричные, близкие к идиоморфным (рис. 2а), а также слабо удлиненные зернистые агрегаты, чаще всего приуроченные к пустотам в кварце. Реже касситерит первой генерации образует в нем включения размером от 0,01 до 2-3 мм. Он встречается и в срастаниях с вольфрамитом, который в виде прожилков пересекает его, а также с арсенопиритом, ровный характер границ с которым указывает на их близодновременное выделение (рис. 2б). Отдельные зерна касситерита первой генерации катаклазированы и сцементированы касситеритом и минералами более поздних стадий кристаллизации. Для касситерита этой генерации характерны равномерные и темные цвета внутренних рефлексов.

Касситерит второй генерации характеризуется удлиненными и игольчатыми формами кристаллов, которые приурочены преимущественно к зальбандам жил кварца, где он совместно с сульфидами (пирит, халькопирит, пирротин и др.) слагает тонкие прожилки размером от 0,5-1,0 см до волосявидных. Характер срастания его с сульфидами указывает на близкие условия их кристаллизации. Касситерит второй генерации имеет более светлую и зональную окраску внутренних рефлексов.

Усредненная (по 22 анализам) кристаллохимическая формула его — $\text{Sn}_{0.99}\text{As}_{0.0005}\text{Cu}_{0.0005}\text{W}_{0.00004}\text{Sc}_{0.0001}\text{Pb}_{0.0002}\text{Sb}_{0.0003}\text{Nb}_{0.0002}\text{Ag}_{0.00002}\text{In}_{0.00003}\text{Ga}_{0.00002}\text{O}_{2.00}$, из которой видно, что в касситерите в виде изоморфных примесей присутствует 10 химических элементов.

Вольфрамит $(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$ один из ранних рудных минералов кварц-касситеритового парагенезиса, где его содержание составляет 5-7%. Встречается в виде зерен таблитчатой формы в кварце, размеры которых изменяются от первых миллиметров до 1-2 см. Реже вольфрамит слагает гнезда до 3-5 см, а также образует скопления зерен в краевых частях обломков метасоматитов, заключенных в кварце. Тесно ассоциирует с касситеритом и арсенопиритом, которые обрастают его выделения без признаков замещения. В процессе последующего минералообразования вольфрамит испытывал перекристаллизацию, особенно при замещении его шеелитом по периферии табличек, по спайности, а также вдоль многочисленных трещинок в зернах вольфрамитовых гнездах становится преобладающим и содержит разрозненные зерна первичного, но уже не черного, а красновато-бурого вольфрамитового шеелита. Нередко наблюдается полное замещение вольфрамитовых гнезд шеелитом, но форма выделений вольфрамитовых гнезд сохраняется, а шеелит при светлой окраске имеет розовый оттенок.

По химическому составу среди вольфрамитов выделяются как промежуточные разновидности, так и крайние члены изоморфного ряда феррберит-гюбнерит. Усредненная его кристаллохимическая формула (по 7 анализам) следующая — $\text{Fe}_{0.51}\text{Mn}_{0.50}\text{W}_{0.99}\text{O}_{4.0}$.

Арсенопирит (FeAsS) один из наиболее ранних и распространенных сульфидов. На его долю

приходится около 20% всех рудных минералов. В минерализованных зонах распределен неравномерно: в одних является главным среди сульфидов, в других его количество мало. Встречается в виде рассеянной вкрапленности метакристаллов в кварц-турмалиновых метасоматитах и кварце, а также в сростаниях с другими минералами.

Арсенопирит почти всегда образует идиоморфные кристаллы, габитус которых меняется. Для ранней стадии рудоотложения характерны короткопризматические кристаллы, а для кварц-касситерит-сульфидной типичны длиннопризматические и игольчатые формы. Арсенопирит тесно ассоциирует с касситеритом, с которым имеет противоречивые взаимоотношения — чаще он корродирует и цементирует раздробленные кристаллы касситерита, иногда же наблюдается ритмичное чередование арсенопиритовых и касситеритовых зон, местами отмечается их тесное сростание без признаков замещения одного минерала другим (обрастание касситерита арсенопиритом).

Ранний арсенопирит образует тесные сростания и с вольфрамитом, с которым так же имеет прямолинейные границы, что свидетельствует о близодновременном их выделении. Особенностью арсенопирита ранней кварц-касситеритовой стадии является его раздробленность (рис. 3а) и цементация минералами более поздних стадий кристаллизации (рис. 3б). Арсенопирит поздней (кварц-касситерит-сульфидной) стадии встречается как в виде слегка раздробленных зерен, которые цементируются пирротинном, сфалеритом, халькопиритом, так и в виде кристаллов, содержащих пойкилитовые включения этих минералов и других сульфидов. В отдельных случаях отмечаются его тесные парагенезисы с выше перечисленными минералами. В аншли-

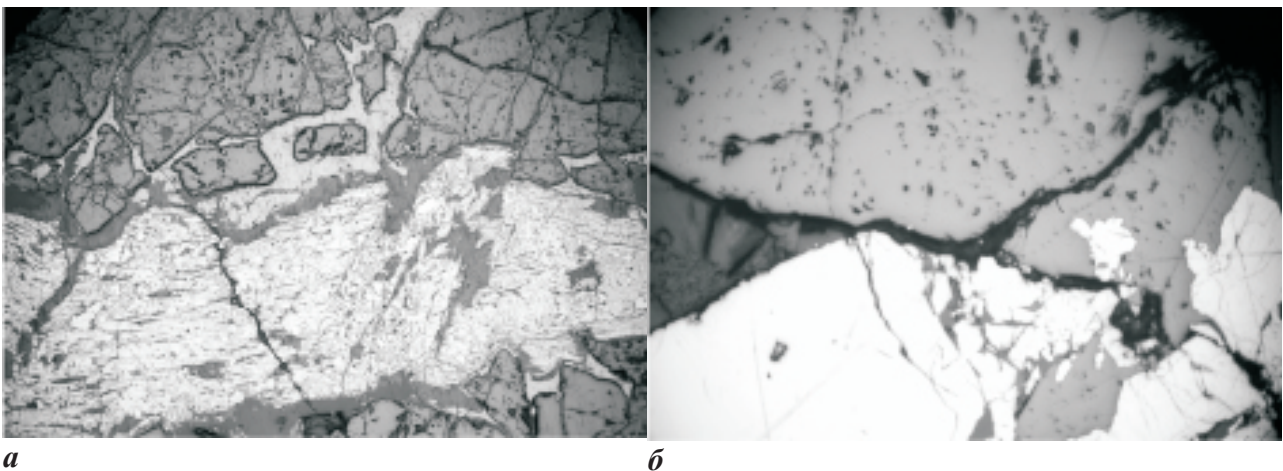


Рис. 2. Взаимоотношения касситерита с сульфидами. Полированные шлифы, николи ||: *а* — идиоморфные выделения касситерита (темно-серое), которые замещаются сульфидами (светло-серое), обр. КК-С 38, увел. 90; *б* — сростание касситерита (темно-серое) и арсенопирита — (светло-серое), КК-С 15/1, увел. 70.

фах можно видеть нарастание идиоморфных кристаллов арсенопирита на аллотриоморфные выделения сфалерита. Этот агрегат, в свою очередь, цементируется мелкозернистым сфалеритом. С арсенопиритом тесно ассоциирует кобальтин, самородный висмут, который в виде каплевидных включений и неправильных выделений располагается в интерстициях между кристаллами арсенопирита. Кристаллохимическая формула арсенопирита (среднее по 50 анализам) следующая – $Fe_{0,97}As_{0,95}Cu_{0,001}Co_{0,01}Ni_{0,001}Pb_{0,0003}Sb_{0,004}Bi_{0,0002}S_{1,06}$.

Шеелит ($CaWO_4$) широко распространен в рудах. Его содержание в среднем составляет 4%. Кристаллизовался он в раннюю кварц-касситеритовую стадию совместно с касситеритом и арсенопиритом, но несколько позже последних, так как замещает их. Кроме того, шеелит развивается по вольфрамиту и нередко нацело замещает последний, наследуя при этом форму его выделений. Он обычно образует мелкую вкрапленность (до 0.25 мм), а иногда и крупные бипирамидальные кристаллы (до 1 см) в жильном кварце. Его кристаллохимическая формула $Ca_{0,99}W_{1,02}Fe_{0,0023}Mn_{0,0021}Cu_{0,0001}Ti_{0,0001}Sr_{0,001}In_{0,00003}O_4$.

Пирротин (FeS) также один из наиболее распространенных сульфидов (10%), но распределен крайне неравномерно. Он слагает как мономинеральные жилы мощностью до 60 см, рассекающие кварцевые турмалиниты и касситерит-арсенопиритово-кварцевые жилы, так и более мелкие прожилки, а также образует вкрапления в турмалинитах и кварце. Выделяется две генерации пирротина, причем, первая резко преобладает. Форма выделений пирротина неправильная, но изредка наблюдаются гексагональные пластинки размером до 3-5 мм. Пирротин первой генерации цементирует обломки раздробленного арсенопирита и касситерита ранней стадии.

В свою очередь корродируется халькопиритом, галенитом, джемсонитом. Взаимоотношения его со сфалеритом не всегда ясны. Чаще пирротин рассекается тонкими прожилками сфалерита, который замещает его по периферии агрегатов, образуя в них глубокие неправильной формы бухтообразные заливы. Реже в пирротине встречаются линзовидные включения сфалерита, а под микроскопом видны прожилки пирротина, секущего сфалерит. В пирротине, кроме того, встречаются также обособления станнина с мелкозернистым касситеритом и халькопиритом. Такие взаимоотношения позволяют считать, что пирротин отлагался позднее арсенопирита и касситерита, которые он цементирует и замещает, но раньше других сульфидов.

Пирротин второй генерации распространен мало. Он отмечается в виде мельчайшей эмульсионной (пластинчатой и каплевидной) вкрапленности в сфалерите как продукт распада твердого раствора, приуроченный преимущественно к границам зерен сфалерита. Часто пирротин ассоциирует с эмульсионными включениями халькопирита.

Пирротин повсеместно подвергается дисульфидизации, что проявляется в образовании по нему грубопластинчатых псевдоморфоз пирита с мельчайшими червеобразными вростками магнетита или пирит-марказит-мельниковитового агрегата. Рассчитанная кристаллохимическая формула – $Fe_{0,91}As_{0,003}Cu_{0,002}Co_{0,0003}Sb_{0,00004}Pb_{0,001}Ni_{0,00001}Bi_{0,00002}S_{1,08}$.

Пирит (FeS_2) широко распространен в рудах. Его содержание составляет порядка 10%. Он встречается как в кварцевых жилах, так и в околорудных измененных вмещающих породах, где образует вкрапленность идиоморфных кристаллов. Ассоциирует с арсенопиритом, границы срастания с которым ровные, цементируется пирротинном и другими сульфидами. Часты слу-

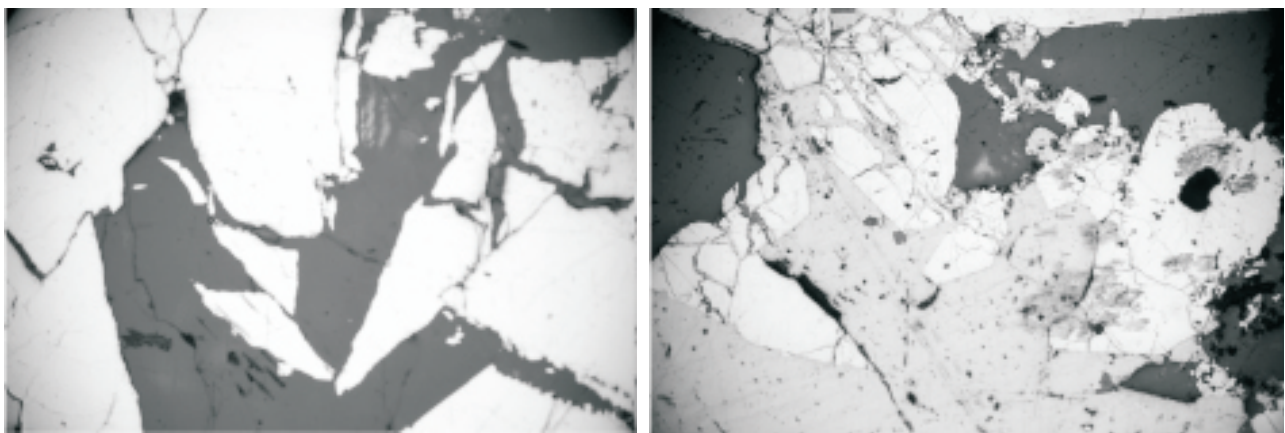


Рис. 3. Морфология минеральных выделений арсенопирита и халькопирита. Полированные шлифы, николи ||: *а* – раздробленные зерна арсенопирита (белое), обр. КК-С 8, увел. 90; *б* – замещение арсенопирита (белое) халькопиритом (светло-серое), обр. КК-С 27/2, увел. 120.

чай замещения пирита халькопиритом с образованием довольно крупных кристаллов, в которых наблюдаются звездчатые включения сфалерита, характерные для продуктов распада твердых растворов халькопирита. Кристаллохимическая формула пирита (среднее по 8 анализам) — $Fe_{0.96}As_{0.04}Co_{0.0001}Ni_{0.004}Sb_{0.001}Bi_{0.00003}T_{10.000001}S_{1.97}$.

Выделяется и более поздний пирит (второй генерации) в тесной ассоциации с марказитом и мельниковитом. Этот парагенезис дисульфидов железа образовался за счет разложения пирротина в результате воздействия поздних гидротермальных и поверхностных растворов.

Сфалерит (ZnS) составляет 7% среди рудных минералов. По форме зерен, кристалличности и характерным минеральным ассоциациям выделяется три его генерации. Сфалерит первой генерации, образовавшийся в кварц-касситерит-сульфидную стадию, наиболее распространен. Он встречается в виде аллотриоморфных минеральных выделений и характеризуется наличием обильных эмульсионных включений (продуктов распада твердого раствора) халькопирита, пирротина и редко кубанита и валлериита в сростании с халькопиритом. Каплевидные и пластинчатые зерна таких продуктов располагаются обычно по границам зерен, по трещинам спайности и, сливаясь, образуют тончайшие прожилки. В сфалерите отмечаются и реликты арсенопирита и касситерита размером до 0.01 мм, а также развитие каемок станнина по сфалериту. Редко в сфалерите встречаются мелкие единичные и короткие прожилки касситерита шириной до 0.02 мм. Сфалерит тесно ассоциирует с пирротинном, взаимоотношения с которым описаны выше. Также сложны взаимоотношения сфалерита с аллотриоморфным халькопиритом. Чаще сфалерит корродируется халькопиритом и сечется его прожилками, но иногда можно видеть и обратные соотношения; что свидетельствует об их близком по времени образовании.

Сфалерит второй генерации распространен не так широко и присутствует в виде звездчатых выделений в халькопирите как продукт распада твердых растворов. Его звездчатые выделения сохраняются в метакристаллах пирита, заместивших халькопирит, что позволяет судить о времени выделения продуктов распада твердых растворов.

Сфалерит третьей генерации характерен для кварц-карбонатно-сульфидных прожилков, пересекающих со смещением главные кварц-касситерит-сульфидные жилы. Сфалерит этой генерации лишен продуктов распада твердого раствора, что обусловлено более низкой температурой его образования. Он ассоциирует с пирротинном, галенитом, халькопиритом, станнином. Сфалерит образует довольно крупные гнезда и кристаллы тетраэдрического облика либо

тонкозернистые сростки с галенитом, халькопиритом, станнином и поздним касситеритом. Как и в кварц-касситерит-сульфидной ассоциации, так и в кварц-карбонатно-сульфидных жилах сфалерит кристаллизовался несколько позднее, чем ассоциирующий с ним пирротин. Вместе с галенитом он заполняет интерстиции в виде пластинчатых агрегатов. Иногда сфалерит образует псевдоморфозы по кварцу.

В химическом отношении сфалериты всех генераций относятся к высокожелезистой разновидности — марматиту, где содержание железа изменяется от 11.33 до 12.82%, что соответствует в среднем 0.22 ат. в формуле. Рассчитанная его кристаллохимическая формула (среднее по 10 анализам) — $Zn_{0.74}Fe_{0.22}Mn_{0.01}Pb_{0.0003}Cu_{0.01}Sn_{0.0003}Cd_{0.002}In_{0.0001}S_{1.02}$.

Халькопирит (CuFeS₂) распространен во всех минерализованных зонах, где его содержание в среднем составляет 8%. Морфология минеральных выделений, их размер, а также приуроченность халькопирита к определенным минеральным ассоциациям свидетельствуют о том, что он выделялся неоднократно и образует несколько генераций.

Халькопирит первой генерации отлагался в кварц-касситерит-сульфидную стадию и кристаллизовался позже арсенопирита, о чем свидетельствуют часто наблюдающиеся явления коррозии и цементации раздробленного арсенопирита (рис. 3б). Аналогичные взаимоотношения халькопирита установлены с турмалином, где он проникает в его радиально-лучистые агрегаты по трещинкам, а также развивается между его игольчатыми кристаллами, корродируя и замещающая их. Более сложные взаимоотношения установлены для халькопирита со сфалеритом, в котором халькопирит образует прожилки, гнезда, заливы и ксеноморфные выделения, часто замещающая его по линиям двойниковых швов. Кроме того, отмечаются и линзообразные обособления халькопирита, содержащие в виде продуктов распада редкие звездочки и прожилки сфалерита. Часто в агрегатах халькопирита наблюдаются неправильные пойкилитовые включения галенита, а в агрегатах галенита присутствуют мелкие зерна и прожилки халькопирита. Такой характер взаимоотношений указывает на близкое или одновременное выделение этих трех минералов. Отмечается также тесная ассоциация халькопирита с поздним мелкозернистым касситеритом. Иногда цепочки зерен касситерита располагаются по периферии агрегатов халькопирита. Порой мелкие зерна халькопирита заключены в массу касситерита. Халькопирит корродируется станнином и иногда пиритом. При этом пирит замещает его, образуя метакристаллы, сохраняющие реликтовые звездчатые включения сфалерита.

та — продукты распада твердых растворов бывшего здесь ранее халькопирита.

Халькопирит второй генерации образует эмульсионную вкрапленность в сфалерите в виде микроскопических овальных и каплевидных зерен и пластинок, часто в срастании с пирротинитом и кубанитом, а также линзовидные обособления, расположенные вдоль границ сфалеритовых зерен. Значительно реже эмульсионные включения халькопирита встречаются в позднем сфалерите и станнине.

Халькопирит третьей генерации менее распространен в рудах и связан с минералами кварц-карбонатно-сульфидной ассоциации. Он образует прожилковидные или мелкие неправильной формы выделения, пересекающие и корродирующие сфалерит, пирротин, а также минералы более ранних ассоциаций. Этот халькопирит, так же как и первый, образует тесные сростки со станнином и галенитом. Он имеет аллотриморфнозернистую структуру и лишен эмульсионной вкрапленности сфалерита. В зоне гипергенеза халькопирит иногда замещается халькозином, ковеллином и изредка борнитом, образующими прожилки и оторочки по халькопириту. Усредненная (по 14 анализам) кристаллохимическая формула халькопирита — $Cu_{0.83}Fe_{1.10}Ag_{0.0002}Pb_{0.003}Sn_{0.02}As_{0.004}Sb_{0.0004}Bi_{0.0002}In_{0.0002}S_{2.04}$.

Галенит (PbS) составляет 5-7% от всех рудных минералов. Он кристаллизовался как в кварц-касситерит-сульфидную, так и в кварц-карбонатно-сульфидную стадии. При микроскопическом исследовании устанавливается, что галенит всегда ксеноморфен по отношению к другим сульфидам. Наиболее ранний галенит слагает жилки, прожилковые зоны, рассекая и корродируя другие сульфиды (арсенопирит, пирротин, сфалерит, а в отдельных случаях и станнин), а также образует обильную вкрапленность лапчатой формы (рис. 4а). В кварце и турмалинитах галенит встречается в виде линзовидных обособлений и прожилковидных выделений, причем, как и халькопирит, он развивается по пластинчатым агрегатам турмалина. Иногда вместе со сфалеритом галенит выполняет интерстиции между пластинчатыми зернами пирротина. Галенит также замещает сфалерит, с сохранением бывшей ранее в сфалерите эмульсионной халькопиритовой вкрапленности. В галените в виде мельчайших каплевидных выделений очень редко встречаются самородное серебро и висмут. Галенит тесно ассоциирует с буланжеритом.

Поздний галенит (кварц-карбонатно-сульфидной стадии) встречается в виде мало-мощных прожилков и ассоциирует с пирротинитом, сфалеритом, корродируя их. Взаимоотношения галенита с халькопиритом, как отмечалось выше,

сложные. Галенит и халькопирит пересекают друг друга тонкими прожилками, но чаще более поздним является галенит. Усредненная (по 17 анализам) кристаллохимическая формула галенита следующая — $Pb_{0.94}Zn_{0.02}Fe_{0.05}Sn_{0.002}Ag_{0.002}Bi_{0.002}As_{0.01}Sb_{0.003}S_{0.97}$.

Станнин (Cu₂FeSnS₄) присутствует в рудах в количестве 5-7%. Он тесно ассоциирует с сульфидами кварц-касситерит-сульфидной стадии. Встречается в виде аллотриоморфных зерен, близких, к изометричным, в виде эмульсий, прожилков, каемок, вростков. Весьма обычны реакционные каемки станнина по периферии раздробленных зерен касситерита ранней стадии (рис. 4б). Наблюдается также как чередование каемок касситерита и станнина или обрастание касситеритовой каймы станниновой, так и обрастание станнина по зальбандам касситеритовых прожилков, секущих сульфиды, что является результатом реакционного (диффузионного) взаимодействия. Иногда станнин цементирует микродрузы кристаллов касситерита, нарастающие на включения кварца в сульфидах.

По отношению к сульфидам станнин относительно поздний минерал. Он выделялся позже арсенопирита и пирротина, но раньше галенита. Взаимоотношения его со сфалеритом и халькопиритом носят сложный характер. В одних случаях эти минералы сростаются без признаков коррозии одного другим, что свидетельствует о близком или одновременном их выделении, в других часты пламенивидные вростки станнина в сфалерите, а также его эмульсионные включения в сфалерите и халькопирите, представляющие продукты распада твердых растворов. Отмечается и диффузионное замещение сфалерита станнином в виде тонких прожилков и каемок с сохранением его внутреннего строения, а именно, полисинтетических двойников. Такой тип замещения характерен для станнина самой поздней кварц-карбонатной стадии. Рассчитанная кристаллохимическая формула станнина — $Cu_{2.31}Fe_{0.94}Zn_{0.08}As_{0.03}Sn_{0.82}S_{3.83}$.

Тиллит (PbSnS₂) обнаружен в незначительных количествах (менее 1 %) в рудах кварц-касситеритовой и кварц-касситерит-сульфидной стадий. В первой он образует совместно с касситеритом тонкие (до 0.05 мм) оторочки вокруг катаклазированных зерен арсенопирита, а также проникает в него по трещинам. Во второй встречается в виде мелких пластинчатых выделений в халькопирите размером до 0.01 мм, ассоциирующих с касситеритом.

Бурнонит (PbCuSbS₃) редкий минерал. Его количество менее 1%. Ассоциирует с сульфидами кварц-касситерит-сульфидной стадии. Встречается в виде мелкой вкрапленности, гнезд, достигающих в поперечнике 1 см, а также тонких

прожилков, рассекающих зерна арсенопирита, сфалерита, пирротина. Тесно ассоциирует с халькопиритом, с которым образует тесные срастания со следами взаимной коррозии, а также содержит многочисленные включения округлых халькопиритовых зерен. Характер таких взаимоотношений свидетельствует о его более поздней кристаллизации по отношению к халькопириту. В бурноните нередки ксеноморфные выделения блеклой руды, размеры которых не превышают 0.01 мм, а также мельчайшая вкрапленность пластинок самородного серебра. Сам же бурнонит рассечен тончайшими прожилками буланжерита. По трещинам в бурноните развиваются розетки ковеллина. Его кристаллохимическая формула – $Pb_{0.90}Cu_{0.90}Fe_{0.12}Zn_{0.03}Sb_{0.89}As_{0.002}S_{3.2}$.

Минералы группы джемсонита-буланжерита ($Pb_4FeSb_6S_{14}$ - $Pb_5Sb_4S_{11}$) встречаются в небольшом количестве (до 1%). Они ассоциируют с сульфидами кварц-касситерит-сульфидной стадии и образовались на заключительных ее этапах. Из минералов этой группы преобладает буланжерит, который образует мелкозернистые, а также спутанные длинноигольчатые агрегаты, выполняющие пустоты в кварц-касситерит-сульфидных рудах. Кроме того, буланжерит встречается в виде выделений неправильной формы и агрегатов из пластинчатых зерен по границам кристаллов кварца, а иногда образует вроски в нем. В карбонате буланжерит выделяется в виде пластинок и иголок, располагающихся как по границам его зерен, так и по трещинам спайности в нем. В виде многочисленных иголок присутствует также в сфалерите и галените. Замещает бурнонит и халькопирит.

Джемсонит встречается в виде войлокоподобных агрегатов, выполняющих промежутки в крупнозернистом кварце. Рассчитанная кристаллохимическая формула его соответствует $Pb_{4.01}Cu_{0.02}Fe_{0.90}Zn_{0.02}Ag_{0.004}Sb_{6.01}As_{0.01}Bi_{0.01}S_{14.02}$.

Висмутин (Bi_2S_3) является редким минералом (сотые доли процента). Он образует мелкую рассеянную вкрапленность или зернистые агрегаты размером до 0.5 мм в кварце. Тесно ассоциирует с халькопиритом и арсенопиритом, в которых он образует тонкие пластинки длиной до 0.05 мм. Иногда встречается в срастании с самородным висмутом и галенитом, образуя в последнем мелкие агрегаты неправильной формы.

Висмут самородный (Bi), как и висмутин, встречается в ассоциации с сульфидами, концентрируясь преимущественно в виде мелких, иногда обильных, каплевидных зерен в галените, благодаря чему содержание висмута в последнем достигает 5%. Более широко самородный висмут распространен в арсенопирите. В нем он присутствует в виде пластинок и выделений неправильной формы, приуроченных, преимущественно, к периферическим частям его гипидиоморфных кристаллов или располагаясь в межзерновом пространстве арсенопиритовых агрегатов. Распределение висмута в арсенопирите неравномерное.

Блеклая руда ($Cu_{12}[As,Sb]_4S_{13}$) крайне редка (около 1%) в рудах и образует тонкие оторочки по периферии выделений галенита и халькопирита. По химическому составу это теннантит-тетраэдрит.

Кубанит ($CuFe_2S_3$) очень редкий минерал (менее 1%). Встречается в срастаниях с халькопиритом и пирротинном, совместно с которыми образует эмульсионную и пластинчатую вкрапленность в сфалерите, являясь продуктом распада твердого раствора.

Валлериит ($Cu_2Fe_4S_7$) образует зерна клиновидной формы размером до 0.02-0.06 мм внутри эмульсионных включений халькопирита в сфалерите. Его содержание около 1%.

Серебро самородное (Ag) встречается в незначительном количестве (около 1 % от суммы

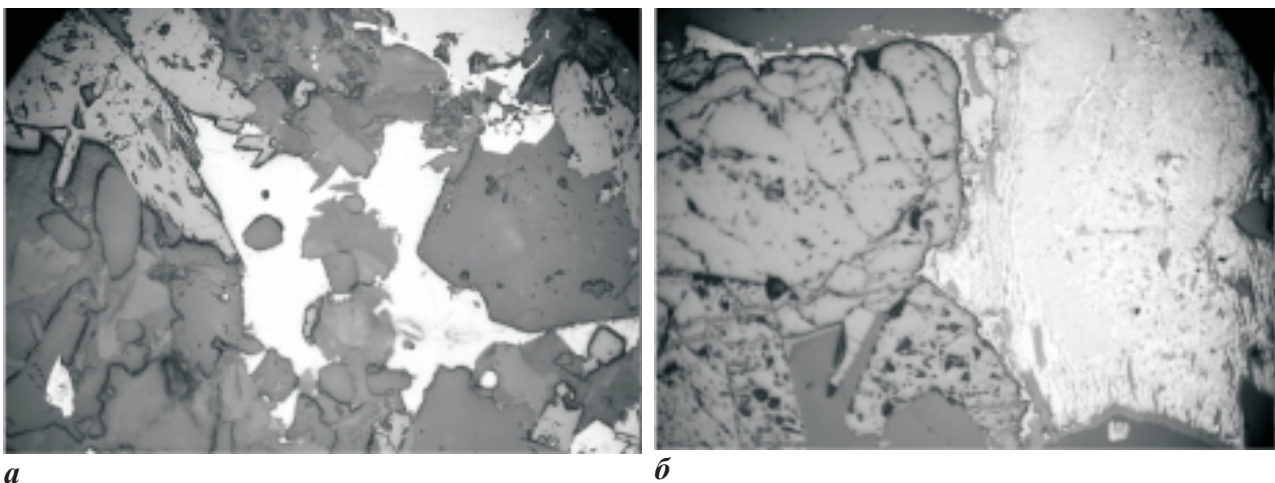


Рис. 4. Характер срастания касситерита с галенитом и станнином. Полированные шлифы, николи ||: *а* – лапчатые формы галенита (белое), обр. КК-С 12/1, увел. 200; *б* – реакционные каемки станнина (светло-серое) по периферии раздробленных зерен касситерита (темно-серое) обр. КК-С 7, увел. 90.

всех рудных минералов), как в виде зерен аллотриоморфной и каплевидной, так и пластинчатой форм, размером до 0,01 мм, в галените, реже халькопирите и бурноните.

Айкинит ($PbCuBiS_3$) встречается очень редко в виде микроскопических включений аллотриоморфной формы в галените.

Кобальтин ($CoAsS$) обнаружен в виде редких идиоморфных зерен и их агрегатов, располагающихся по периферии выделений пирита, а также в виде прожилков, пересекающих его. Вместе с тем, кобальтин замещается халькопиритом и пирротинном.

Таким образом, данные минералогического изучения руд Комсомольского района показывают, что в составе лежалых песков хвостохранилищ СОФ и ЦОФ присутствует большое разнообразие рудных минералов, которые представлены, главным образом, сернистыми соединениями (сульфиды и сульфосоли), вольфраматами и оксидами.

СОСТАВ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В РУДНЫХ МИНЕРАЛАХ

В составе рудных минералов, как следует из рассчитанных по данным рентгеноспектральных анализов их кристаллохимических формул, содержится широкий спектр важных в промышленном отношении химических элементов: Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, As, Bi, In, Co, Ni, Ga, Sc, Sr, W, Mn, Sn, Sb, Tl, Ag, Hg. Всего 20 элементов, причем, содержания одних составляют целые проценты, других – десятые доли процента, а третьих – не превышают тысячные доли процента. Почти половина из этих элементов (Fe, Zn, Cu, Pb, Sb, As и Bi) образует собственные минеральные формы (являются минералообразующими), а также присутствует в виде изоморфной примеси в других минералах. Другая часть элементов (Cd, In, Ni, Ga, Sc, Sr, Tl, Mn, Hg и др.) встречается только в виде изоморфной примеси (табл. 3). Приведем данные по распространенности и содержанию химических элементов в основных рудных минералах из месторождений Комсомольского района.

Индий. Минералами-концентраторами индия являются касситерит, содержащий его в количестве от 0.0005 до 0.0035%, сфалерит – от 0.01 до 0.28% и халькопирит – от 0.001 до 0.042%. В незначительных количествах (0.003 %) индий присутствует в шеелите. Во всех минералах отмечается значительный разброс содержаний индия. При этом повышение содержания отмечается для поздней сульфидной ассоциации – в халькопирите и сфалерите, где оно на порядок выше, чем в касситерите.

Кобальт и никель. Концентрируются преимуще-

ственно в арсенопиритах в количествах 0.04–0.8 и 0.01–0.45%, соответственно. Для кобальта, кроме того, установлен и самостоятельный минерал – кобальтин. В небольшом количестве эти элементы установлены в пирротине (0.02–0.04 и 0.001–0.03%). В пиритах кварц-касситеритовой стадии содержание никеля колеблется от 0.02 до 1%, а кобальта – от 0.003 до 0.14%.

Сурьма. В виде примеси присутствует в большинстве рудных минералов, но содержания ее существенно меняются. Наибольшие ее количества отмечаются в арсенопирите – 0.01–2%, галените – 0.01–1% и халькопирите – 0.003–0.254%. Незначительные содержания сурьмы отмечаются в пирите (от 0.012 до 0.08%) и пирротине – 0.005%.

Висмут. Составляет характерную примесь в арсенопирите, где его содержание изменяется от 0.01 до 0.7%. Нередко в арсенопирите отмечаются выделения самородного висмута, очевидно в результате распада первоначального твердого раствора. В достаточно большом количестве висмут присутствует в галените – 0.001–1.73%, халькопирите – 0.03–0.55% и группе минералов джемсонит-буланжеритового ряда – 0.41–0.75%. В меньших количествах висмут отмечается в пирите – 0.006–0.05% и пирротине – 0.006%.

Серебро. В виде примеси присутствует в галените и халькопирите, где его содержание колеблется от 0.04 до 0.80% и от 0.01 до 0.14%, соответственно. В незначительном количестве (0.01–0.03%) серебро присутствует в минералах джемсонит-буланжеритового ряда.

Мышьяк. Помимо арсенопирита, где его содержание 41.56–46.38%, присутствует в виде изоморфной примеси в пирите (0.5–4.8%), халькопирите (0.09–3.82%), пирротине (0.24%), станнине (0.01–0.4%), галените (0.2–0.24%), бурноните (0.01–0.03%) и джемсоните (0.04–0.07%).

Свинец. В количестве от 0.1 до 1.35% установлен в халькопирите, что вероятно обусловлено механической примесью. В арсенопирите его содержание 0.03–0.58%, пирротине – 0.18%, сфалерите – 0.01 до 0.13%.

Цинк. Встречается в бурноните и джемсоните в количестве 0.03–0.06 и 0.03–0.08%. Более высокие его значения отмечаются в галените (0.09–0.9%) и станнине (3.08%).

Марганец. Постоянно присутствует в вольфрамите от 3.20 до 17.70%. В небольших количествах он присутствует в шеелите – 0.06–0.19%, галените – 0.01–0.03% и сфалерите – 0.21–0.62%.

Железо. Характерная примесь рудных минералов, но количество его существенно меняется. Наиболее высокие его значения зафиксированы для сфалерита (11.33–12.82%) и вольфрамита (5.61–20.59%). Существенные содержания железа отмечаются в бурноните – 1–3%, джемсоните –

Таблица 3. Формы нахождения экономически важных элементов в рудах

Элементы	Форма	
	Минералообразующие	Изоморфная примесь
Fe	Вольфрамит, арсенопирит, шеелит, пирротин, пирит, халькопирит, станнин, кубанит, валлериит	Сфалерит, галенит, бурнонит, джемсонит, тиллит, висмутин, айкинит, кобальтин, касситерит
As	Арсенопирит, кобальтин	Пирротин, пирит, халькопирит, галенит, станнин, бурнонит, джемсонит, блеклые руды, касситерит
Pb	Галенит, бурнонит, джемсонит, тиллит, айкинит	Арсенопирит, пирротин, сфалерит, халькопирит, блеклые руды, касситерит
Zn	Сфалерит	Галенит, станнин, бурнонит, джемсонит, тиллит
Bi	Висмутин, айкинит	Арсенопирит, пирротин, халькопирит, пирит, галенит, джемсонит, блеклые руды
Sb	Бурнонит, джемсонит, блеклые руды	Арсенопирит, пирротин, пирит, халькопирит, галенит, касситерит
Cu	Халькопирит, станнин, бурнонит, блеклые руды, кубанит, валлериит, айкинит	Арсенопирит, шеелит, пирротин, сфалерит, джемсонит, висмутин, касситерит
Ag		Халькопирит, галенит, джемсонит, касситерит
W	Вольфрамит, шеелит	
Mn	Вольфрамит	Шеелит, сфалерит, галенит
Ni		Арсенопирит, пирротин, пирит, кубанит, халькопирит, валлериит, кобальтин
Co	Кобальтин	Арсенопирит, пирротин, пирит, кубанит
Sc		Вольфрамит, касситерит
Sr		Шеелит
In		Шеелит, сфалерит, халькопирит, касситерит
Tl		Пирит
Hg		Халькопирит, галенит
Cd		Сфалерит
Ga		Халькопирит, касситерит

1.01-3.04% и галените – 0.17-2.52%, а малые – в шеелите (0.10-0.16%).

Медь. В существенных количествах встречается в арсенопирите (от 0.1 до 1.6%) и сфалерите (0.28-1.98%). Несколько меньше в пирротине – 0.13-0.16%, джемсоните – 0.039-0.07% и шеелите – 0.005%.

Для руд месторождений Комсомольского района отмечается еще целый ряд элементов, входящих в кристаллические решетки минералов в виде изоморфной примеси, определенных спектральным анализом. Это **кадмий**, постоянно присутствующий в сфалеритах в количестве от 0.11 до 0.39%, **стронций**, обнаруженный в единичных пробах шеелита (0.05%), **скандий**, выявленный в вольфрамите (0.001%) и касситерите (0.003%), **галлий**, установленный в халькопирите (0.00025-0.001%) и касситерите (0.002%) и **таллий**, который встречается в пирите (0.0002%).

ПРОГНОЗНЫЕ РЕСУРСЫ

Согласно приведенным данным изучения вещественного состава хвостохранилищ уста-

новлено, что лежалые пески состоят из зерен псаммитовой и алевритовой размерности, представленных ороговикованными породами (48% для СОФ и 45% для ЦОФ), кварцем (соответственно 35% и 37%), турмалином (10% и 13%) и рудными минералами (7% и 5% соответственно). Количество рудных минералов, рассчитанные нами пропорционально их содержаниям в первичных рудах и с учетом данных изучения керна, приведены в табл. 1 и 2.

Основываясь на данных по среднему содержанию химических элементов в рудных минералах и количеству этих минералов в лежалых песках хвостохранилищ, авторами был произведен подсчет ориентировочных запасов полезных компонентов (по 22 элементам), имеющих ту или иную промышленную ценность (табл. 1, 2). Суммированные данные по каждому элементу приведены в табл. 4.

Количество экономически важных элементов, содержащихся в хвостохранилище СОФ, составляет 632398.8 т, а в хвостохранилище ЦОФ – 1199767 т. Наибольшие содержания имеют

Таблица 4. Количество металлов в хвостохранилищах СОФ и ЦОФ.

Элемент	Прогнозные ресурсы, т		
	СОФ	ЦОФ	Итого
W	8868.4	39222.6	48091
Mn	744.864	3345.1	4089.964
Fe	234702.3	353247.5	587949.8
Sn	25192.1	44064.0	69256.1
Sc	0.8	1.4	2.2
S	181463.4	385630.1	567093.5
As	66215.0	76425.4	142640.4
Pb	19363.1	124279.8	143642.9
Zn	8309.6	51211.4	59521.0
Bi	7991.4	25893.2	33884.6
Cd	48.4	298.7	347.1
Ga	1.5	1.5	3.0
Sb	12189.8	31847.74	44037.54
Ni	356.5	970.5	1327.0
Co	1974.0	4513.4	6487.4
Cu	64876.8	58282.1	123158.9
Sr	2.6	12.1	14.7
In	43.0	126.0	169
Tl	0.2	0.6	0.8
Ag	54.8	393.0	447.8
Hg	0.2	1.1	1.3
Итого	632398.8	1199767	1832165.9

S, Fe, Cu, Pb, As, Sn, Zn, W, Sb и Bi, но и количества редких элементов также существенны. В частности, на хвостохранилище ЦОФ количество Cd, присутствующего в сфалерите в количестве 0.31%, составляет 298.7 тонн, Sr, входящего в шеелит (0.05%) – 12.1 тонн, Tl, установленного в пирите в количестве 0.0002 % – 0.6 тонн, а Hg, выявленной в халькопирите (0.0001%) и в галените (0.001%), составляет 1.1 тонну. На хвостохранилище СОФ запасы этих металлов следующие: Cd – 48.4 т, Sr – 2.6 т, Tl – 0.2 т, Hg – 0.16 т.

На обоих хвостохранилищах сосредоточены еще и огромные количества нерудных кремний-содержащих минералов, которые могут быть использованы для получения жидкого стекла, белой сажи, а также в виде добавок в строительной индустрии (например, при производстве кирпича). Количество этого сырья на хвостохранилище ЦОФ составляет: кварц – 8913300 т, турмалин – 3131700 т, тонкоизмельченная вмещающая порода – 10840500 т. Для хвостохранилища СОФ эти цифры следующие: кварц – 3640000 т, турмалин – 1040000 т, карбонаты – 41600 т, слюда – 26000 т и тонкоизмельченная вмещающая порода – 4992000 т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе минералого-геохимического исследования лежалых песков хвостохранилищ

Солнечного ГОКа осуществлен подсчет суммарных ориентировочных запасов полезных компонентов (табл. 4), из чего следует, что как по основным металлам, так и по редким элементам их (хвостохранилища) можно считать техногенными месторождениями, которые практически готовы к повторной переработке и извлечению широкого спектра элементов.

Учитывая то, что отходы переработки руд находятся на поверхности земли и горная масса в них уже дезинтегрирована (а это резко снижает затраты на их разработку), изученные хвостохранилища Комсомольского района следует рассматривать как дополнительный и относительно дешевый, по сравнению с разработкой новых месторождений, источник минерального сырья.

Список литературы

- Геология, минералогия и геохимия Комсомольского района. М.: Наука, 1971. 335 с.
- Гоневчук Г.А., Гоневчук В.Г. Комсомольский оловорудный район как вероятный аналог Корнуолла (Англия) на Дальнем Востоке России // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 14-23.
- Горная энциклопедия. В 5 томах. Том 5. СССР – Яшма / Под ред. Е. А. Козловский. М.: Советская энциклопедия, 1991. 544 с.
- Зверева В.П. Гипергенные и техногенные ми-

- нералы как показатель экологического состояния оловорудных районов Дальнего Востока // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геохронология*. 2005. № 6. С. 533-538.
- Калинин Е.П.* Минерально-сырьевые ресурсы в мировой экономике // *Вестник*. 2008. № 4. С. 13-20.
- Кемкина Р.А., Кемкин И.В.* Вещественный состав руд и минералого-геохимическая методика оценки потенциального загрязнения окружающей среды токсичными элементами (на примере Прасоловского Au-Ag месторождения). Владивосток: Дальнаука, 2007. 212 с.
- Комаров М.А., Алискеров В.А., Кусевич В.И. и др.* Горно-промышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2007. № 4. С. 3-9.
- Крупская Л.Т.* Оценка воздействия горного производства на почвы Дальнего Востока // *Влияние процессов горного производства на объекты природной среды*. Владивосток: Дальнаука, 1998. С. 80-86.
- Ломакин В.К.* Мировая экономика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 672 с.
- Макаров А.Б.* Техногенные месторождения минерального сырья // *Соросовский образовательный журнал*. 2000. Т. 6. № 8. С. 76-80.
- Минерализованные зоны Комсомольского района. М.: Наука, 1967. 115 с.
- Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г.* Природные ресурсы мира. М.: МГУ, 2006. 500 с.
- Сотников В.И.* Влияние рудных месторождений и их отработки на окружающую среду // *Соросовский образовательный журнал*. 1997. № 5. С. 62-65.
- Тарасенко И.А., Зиньков А.В.* Экологические последствия минералого-геохимических преобразований хвостов обогащения Sn-Ag-Pb-Zn руд. Владивосток: Дальнаука, 2001. 184 с.
- Трубецкой К.М., Уманец В.Н., Никитин М.Б.* Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия // *Горный журнал*. 1989. № 2. С. 6-9.

MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL SUBSTANTIATION FOR PROCESSING OF TAILING DUMPS STALE SANDS AT THE SOLNECHNYI ORE-DRESSING ENTERPRISE (KOM SOMOL'SK AREA, KHABAROVSK REGION)

A.I. Khanchuk¹, R.A. Kemkina², I.V. Kemkin^{1,2}, V.P. Zvereva^{1,2}

¹Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, 690022

²Far East Federal University, Vladivostok, 690090

The paper presents a mineralogical-geochemical characteristic of ores from Komsomolsk tin deposits (Khabarovsk region) disintegrated fragments of which compose a productive part of tailing dumps stale sand at the Solnechnyi ore-dressing enterprise. Calculation of probable ore with the economically important metals was made using data on chemical composition of ore minerals and their content in a dump tails. Taking into account that tails from ore processing with already disintegrated rock mass are on the ground surface, the tailing dumps of Solnechnyi ore-dressing enterprise should be considered as an additional and rather cheap source of mineral raw material.

Keywords: tailing dumps, anthropogenic (technogenic) deposits, ore minerals.