

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ЗАПАСОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В ХВОСТОХРАНИЛИЩАХ КОМСОМОЛЬСКОГО РАЙОНА НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Р.А. Кемкина, А.И. Ханчук, И.В. Кемкин, В.П. Зверева
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Дальневосточный
федеральный университет, e-mail: rkemkina@yandex.ru

Введение

Развитие мировой экономики сопровождается неуклонным ростом потребления природного минерального сырья, в связи с чем, начиная со второй половины XX века, в России и в мире быстрыми темпами развивалась горная промышленность. 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 [1]. При современном уровне добычи запасов, например, цинка осталось на 25–30 лет, а свинца на 50–60 лет [2, 3]. 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 дорожает. Стоимость сырья растет каждый год на 5–10 и более процентов, несмотря на внедрение новой техники и автоматизацию некоторых видов производств.

Вместе с тем вековое развитие горной промышленности привело к накоплению гигантских объемов (только в России около 80 млрд тонн) отходов горнорудного производства – так называемых «хвостов» [4]. Хвостохранилища, по сути, являются техногенными месторождениями [2, 9, 14 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.

Хвостохранилища 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 хвостов очевидна, поскольку их разработка позволяет одновременно решать целый ряд экономических, 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, качество которых снижается вследствие 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, как правило, сульфидами, теллуридами, селенидами, сульфосолями различных металлов, преобразуется в другие минеральные формы и водные растворы и самопроизвольно мигрирует в окружающую среду [3, 5, 7, 12, 13 и др.]. Следовательно, проблема переработки хвостохранилищ является одной из актуальнейших на ближайшую перспективу.

Одним из таких дополнительных источников минерального сырья авторы считают хвостохранилища Солнечного ГОКа, для которых на основе минералого-геохимических исследований рудных минералов ими определены прогнозные количества как основных металлов, так и редких элементов. Результаты этих исследований приводятся ниже.

Краткая характеристика техногенных образований Комсомольского района

Горная промышленность в Комсомольском районе развивается уже более 60 лет. Ее основа – оловянные, медно-оловянные и олово-полиметаллические месторождения, отработка которых осуществлялась открытым (карьеры) и подземным (штольни) способами. Обогащение руд проводилось на двух горно-обогатительных фабриках (Центральной и Солнечной), где из добываемой руды получали концентрат на Sn, Cu, Pb и Zn. Отходы отработанной руды (хвосты) складировались на трех хвостохранилищах рядом с горно-обогатительными фабриками. В настоящее время хвосты на первом (СОФ) и втором (ЦОФ) хвостохранилищах содержатся в сухом виде, а третье хвостохранилище, куда с ЦОФ сбрасывается 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 данного хвостохранилища 20 га, мощность отвальных хвостов 20–25 м, объем 10,6 млн. т. Хвостохранилище ЦОФ занимает 40,3 га, а его объем составляет 24,09 млн т. Здесь в период с 1965 по 2001 г. накапливались отходы переработки руд месторождений Фестивальное (75 %), Перевальное (20 %) и Придорожное (5 %).

Технология гравитационно-флотационной сепарации при обогащении руд такова (а именно такой способ применялся на фабриках Солнечного ГОКа), что в конечный продукт при извлечении трех-четырех полезных компонентов уходит всего 10-20 % от добытой рудной массы. Большая же часть рудного вещества со значительными концентрациями как профилирующих (для данного рудного района), так и попутных ценных металлов сбрасывается в хвостохранилища. Естественно, чтобы получить полное представление о минеральном составе рудной части хвостохранилищ, необходимо располагать детальной информацией о вещественном составе руд отработываемых месторождений. Эти данные, полученные в ходе собственных исследований, а также на основе анализа литературных источников [1, 10 и др.], приводятся ниже.

Минералого-геохимическая характеристика первичных руд Комсомольского района

Как отмечалось выше, 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 [1]: 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, арсенопиритом, пирротинном, 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. Краткое описание главных рудогенных минералов приводится ниже.

Касситерит (SnO_2) является главным промышленным минералом и составляет 20–25 % от всех рудных минералов. Он отлагался на всем протяжении кристаллизации кварц-касситеритовой и кварц-касситерит-сульфидной стадий минералообразования. На это указывают и разная морфология кристаллических зерен (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. 1а), 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 сростаниях с вольфрамитом, который в виде прожилков пересекает его, а также с арсенопиритом, ровный характер границ с которым указывает на их близодновременное выделение (рис. 1б). Отмечается катаклиз зерен касситерита первой генерации и цементация его 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 к зальбандам жил кварца, где он совместно с сульфидами слагает тонкие прожилки размером от 0,5–1,0 см до волосовидных. Среди сульфидов присутствуют пирит, халькопирит, пирротин и др., характер сростания с которыми указывает на близкие условия их кристаллизации. Касситерит второй генерации имеет более светлую и зональную окраску внутренних рефлексов.

Рассчитанная кристаллохимическая формула касситерита (среднее по 22 анализам) – $\text{Sn}_{0,99}\text{As}_{0,0005}\text{Cu}_{0,0005}\text{W}_{0,00004}\text{Sc}_{0,0001}\text{Pb}_{0,0002}\text{Sb}_{0,0003}\text{Nb}_{0,0002}\text{Ag}_{0,00002}\text{In}_{0,00003}\text{Ga}_{0,00002}\text{O}_{2,00}$, из чего видно, что в нем в виде изоморфных примесей присутствует ряд 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, как правило, 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, при этом первичная 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 ферберит-гюбнерит. Усредненная его кристаллохимическая формула (по 7 анализам – $\text{Fe}_{0,51}\text{Mn}_{0,50}\text{W}_{0,99}\text{O}_{4,0}$).

Арсенопирит (FeAsS) – один из наиболее ранних и распространенных сульфидов. На его долю приходится около 20 % от 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 турмалинитах 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 также имеет прямолинейные границы, что свидетельствует о близком или одновременном

их выделении. Особенностью арсенопирита ранней кварцево-касситеритовой стадии является его раздробленность (рис. 2а) и цементация минералами более поздних стадий кристаллизации (рис. 2б). 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. Вместе с тем в отдельных случаях отмечаются его тесные парагенезисы с выше перечисленными минералами. В аншлифах можно видеть нарастание идиоморфных кристаллов арсенопирита на аллотриоморфные выделения сфалерита. Этот агрегат, в свою очередь, цементируется более мелкозернистым сфалеритом. С арсенопиритом тесно ассоциирует кобальтин, а также самородный висмут, который в виде каплевидных включений и неправильных выделений располагается в интерстициях между кристаллами арсенопирита. Кристаллохимическая формула арсенопирита (среднее по 50 анализам): $Fe_{0,97}As_{0,95}Cu_{0,001}Co_{0,01}Ni_{0,001}Pb_{0,0003}Sb_{0,004}Bi_{0,0002}S_{1,06}$.

Шеелит (CaWO₄) 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, 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, пересекающие кварцевые турмалиниты и касситерит-арсенопиритово-кварцевые жилы, так и более мелкие прожилки, а также образует вкрапленность и гнезда в турмалинитах и кварце. Выделяются две генерации пирротина, причем первая резко преобладает. Форма выделений пирротина чаще неправильная, но изредка устанавливаются гексагональные пластинки размером до 3–5 мм.

Пирротин первой генерации цементирует обломки раздробленного арсенопирита и касситерита ранней стадии и корродируется халькопиритом, галенитом, джемсонитом. Взаимоотношения его с сфалеритом не всегда ясны. Чаще пирротин пересекается тонкими прожилками сфалерита, который замещает его по периферии агрегатов, образуя в них

глубокие, неправильной формы, бухтообразные заливки. Значительно реже в пирротине встречаются линзовидные включения сфалерита, а под микроскопом видны прожилки пирротина, секущего сфалерит. В пирротине, кроме того, встречаются обособления станнина с мелкозернистым касситеритом и халькопиритом. Описанные 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 эмульсионной (пластинчатой и каплевидной) вкрапленности в сфалерите как продукт распада твердого раствора, приуроченный преимущественно к границам зерен сфалерита. Часто пирротин ассоциирует здесь с эмульсионными включениями халькопирита.

Пирротин повсеместно подвергается дисульфидизации, что проявляется в образовании по нему грубопластинчатых псевдоморфоз пирита, иногда с мельчайшими червеобразными вростками магнетита или пирит-марказит-мельниковитового агрегата.

Его 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 сростания с которым ровные, цементируется пирротинном и другими сульфидами. Часты случаи замещения пирита халькопиритом с образованием довольно крупных кристаллов, в которых сохраняются звездчатые включения сфалерита, характерные для продуктов распада твердых растворов халькопирита. Выделяется и более поздний пирит (второй генерации) в составе дисульфидов железа.

Кристаллохимическая формула пирита (среднее по 8 анализам) – $Fe_{0,96}As_{0,04}Co_{0,0001}Ni_{0,004}Sb_{0,001}Bi_{0,00003}Pb_{0,000001}S_{1,97}$.

Дисульфиды железа (пирит, марказит, мельниковит) широко распространены в верхних частях минерализованных зон. Они являются поздними минералами и образовались за счет пирротина в результате воздействия на него поздних гидротермальных и поверхностных растворов. Представлены пиритом второй генерации, марказитом и мельниковитом, образующими пирит-марказит-мельниковитовый агрегат.

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 зерен и характеризуется наличием обильных эмульсионных включений (продукты 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 каевок 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. Чаше 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 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 атома 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 (CuFeS_2) 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 (см. рис. 2б). 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 замещая их. Более сложные взаимоотношения установлены для халькопирита со сфалеритом, в котором халькопирит образует прожилки, гнезда, заливы и ксеноморфные выделения, часто замещая 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 массе касситерита. Халькопирит корродируется станнином и иногда пиритом. При этом пирит замещает его, образуя метакристаллы, сохраняющие реликтовые звездчатые включения сфалерита – 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 пирротинном 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 в халькопирите. 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 заключительную, 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. 3а). 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 маломощных прожилков и ассоциирует с пирротином, 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 – $Pb_{0,94}Zn_{0,02}Fe_{0,05}Sn_{0,002}Ag_{0,002}Bi_{0,002}As_{0,01}Sb_{0,003}S_{0,97}$.

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. 3б). Наблюдаются также чередование каемок касситерита и станнина или обрастание касситеритовой каймы станниновой и образование

станнина по зальбандам касситеритовых прожилков, секущих сульфиды, что является, вероятно, 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 срastaются без признаков коррозии одного другим, что свидетельствует о близком или одновременном их выделении, а в других – часты пламенеvidные 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 количествах менее 1 % в рудах кварц-касситерит-сульфидной и кварц-касситеритовой стадий. В первой – совместно с касситеритом он образует 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 содержание не превышает 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 срastания 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 (иногда сростшихся) самородного серебра. Сам же бурнонит рассечен тончайшими прожилками буланжерита. По трещинам в бурноните развиваются и мелкие

розеточки 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 иголочек, располагающихся как по границам его зерен, так и по трещинам спайности в нем. В виде многочисленных иголочек 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 сростании с самородным висмутом, а также с галенитом, образуя в нем мелкие агрегаты неправильной формы.

Висмут самородный (Bi), как и висмутин, встречается в ассоциации с сульфидами, концентрируясь преимущественно в виде мелких каплевидных (иногда обильных) 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. Она представлена смешанным теннантит-тетраэдритовым рядом.

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

Валлериит ($\text{Cu}_2\text{Fe}_4\text{S}_7$) – также редкий минерал (около 1 %). Образует зерна клиновидной формы размером до 0,02–0,06 мм внутри эмульсионных включений халькопирита в сфалерите.

Серебро самородное (Ag) встречается в незначительном количестве (около 1 %), в виде зерен как аллотриоморфной и каплевидной, так и пластинчатой форм, размером до 0,01 мм, в галените, реже халькопирите и бурноните.

Айкинит (PbCuBiS_3) встречается очень редко и 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 вхождения химических элементов в рудные минералы

В составе рудных минералов, как следует из рассчитанных по данным рентгеноспектральных анализов их кристаллохимических формул, содержится широкий спектр (более 20) важных в промышленном отношении химических элементов: Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, As, Bi, In, Co, Ni, Ga, Sc, Sr, и др. Содержания одних элементов 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. Ниже приводятся данные по распространенности и содержанию химических элементов в основных рудных минералах.

Индий. Минералами-концентраторами индия являются касситерит – 0,0005–0,0035, сфалерит – 0,01–0,28 и халькопирит – 0,001–0,042 %. 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 преимущественно в арсенопиритах, где их количество соответственно 0,04–0,8 % и 0,01–0,45 %. Для кобальта, кроме того, установлен и самостоятельный минерал – кобальтин. В небольшом количестве эти элементы присутствуют 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 в 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 %, в 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 всех рудных минералов, но количества его варьируют. Наиболее высокие его значения характерны для сфалерита (11,33–12,82 %) и вольфрамита (5,61–20,59 %). Существенные содержания железа отмечаются в бурноните – 1–3 %, джемсоните – 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 %.

В рудах месторождений Комсомольского района установлено присутствие еще целого ряда элементов, входящих в кристаллические решетки минералов в виде изоморфной примеси. 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

В конце 1980-х годов с целью изучения условий залегания лежалых песков, их физико-механических свойств, гранулометрического и вещественного состава на хвостохранилищах СОФ и ЦОФ Солнечным ГОКом были пробурены скважины. По данным изучения керна было установлено, что отвальные хвосты состоят из зерен псаммитовой и алевритовой размерности, представленных ороговикованными породами (48 % для ЦОФ и 45 % для СОФ), кварцем (соответственно 35 и 37 %), турмалином (соответственно 10 и 13 %) и рудными минералами (соответственно 7 и 5 %).

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.

Исходя из этих данных, объем экономически важных элементов, содержащихся в хвостохранилище ЦОФ, составляет 632398,8 т, а в хвостохранилище СОФ – 1199767 т. Наибольшими содержаниями из них отличаются такие элементы, как S, Fe, Cu, Pb, As, Sn, Zn, W, Sb и Bi, но и количества редких элементов также существенны. В частности, на хвостохранилище СОФ количество **Cd**, присутствующего в сфалерите в количестве 0,31 %, составляет **298,7** т, количество **Sr**, входящего в шеелит (0,05 %), – **12,1** т, содержание **Tl**, установленного в пирите, оценивается в 0,0002 % – **0,6** т, а количество **Hg**, выявленной в халькопирите (0,0001 %) и в галените (0,001 %), составляет **1,1** т. На хвостохранилище ЦОФ запасы этих металлов следующие (в тоннах): **Cd – 48,4; Sr – 2,6; Tl – 0,2; Hg – 0,16**.

Кроме того, на обоих хвостохранилищах сосредоточены огромные количества нерудных кремнийсодержащих минералов, которые могут быть использованы для получения жидкого стекла и белой сажи, а также в строительной индустрии в виде добавок, например при производстве кирпича. Количество этого сырья на хвостохранилище СОФ составляет (в тоннах): кварца – 8913300, турмалина – 3131700, а тонкоизмельченной вмещающей породы – 10840500. Для хвостохранилища ЦОФ эти цифры следующие: кварца – 3640000, турмалина – 1040000, карбонатов – 41600, слюды – 26000 и тонкоизмельченной вмещающей породы – 4992000.

Заключение

Подсчет суммарных ориентировочных запасов полезных компонентов по двум хвостохранилищам Комсомольского района показывает, что как по основным металлам, так и по редким элементам их можно считать техногенными месторождениями, которые практически готовы к повторной переработке и извлечению из них 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), хвостохранилища Комсомольского района следует рассматривать как дополнительный и относительно дешевый, по сравнению с разработкой месторождений, источник минерального сырья.

Работа выполнена в рамках основных заданий Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, ГК № 02.740.11.0723.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология, минералогия и геохимия Комсомольского района. М.: Наука, 1971. 335 с.
2. Горная энциклопедия: в 5 т. Т. 5. СССР – Яшма / Ред. Е.А. Козловский. М.: Сов. энциклопедия, 1991. 544 с.
3. *Зверева В.П.* Гипергенные и техногенные минералы как показатель экологического состояния оловорудных районов Дальнего Востока // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология.* 2005. № 6. С. 533–538.
4. *Калинин Е.П.* Минерально-сырьевые ресурсы в мировой экономике // *Вестник.* 2008. № 4. С. 13-20.
5. *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.
6. *Комаров М.А., Алискеров В.А., Кусевич В.И., Заверткин В.Л.* Горно-промышленные отходы – дополнительный источник минерального сырья // *Минеральные ресурсы России: экономика и управление.* 2007. № 4. С. 3–9.
7. *Крупская Л.Т.* Оценка воздействия горного производства на почвы Дальнего Востока // *Влияние процессов горного производства на объекты природной среды.* Владивосток, 1998. С. 80–86.
8. *Ломакин В.К.* Мировая экономика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 672 с.
9. *Макаров А.Б.* Техногенные месторождения минерального сырья // *Соросовский образоват. журн.* 2000. Т. 6, № 8. С. 76–80.
10. Минерализованные зоны Комсомольского района. М.: Наука, 1967. 115 с.
11. *Романова Э.П., Куракова Л.И., Ермаков Ю.Г.* Природные ресурсы мира. М.:Изд-во МГУ, 2006. 500 с.
12. *Сотников В.И.* Влияние рудных месторождений и их отработки на окружающую среду // *Соросовский образоват. журн.* 1997. № 5. С. 62–65.
13. *Тарасенко И.А., Зиньков А.В.* Экологические последствия минералого-геохимических преобразований хвостов обогащения Sn-Ag-Pb-Zn руд. Владивосток: Дальнаука, 2001. 184 с.
14. *Трубецкой К.М., Уманец В.Н., Никитин М.Б.* Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия // *Горн. журн.* 1989. № 2. С. 6–9.

ПРИЛОЖЕНИЕ

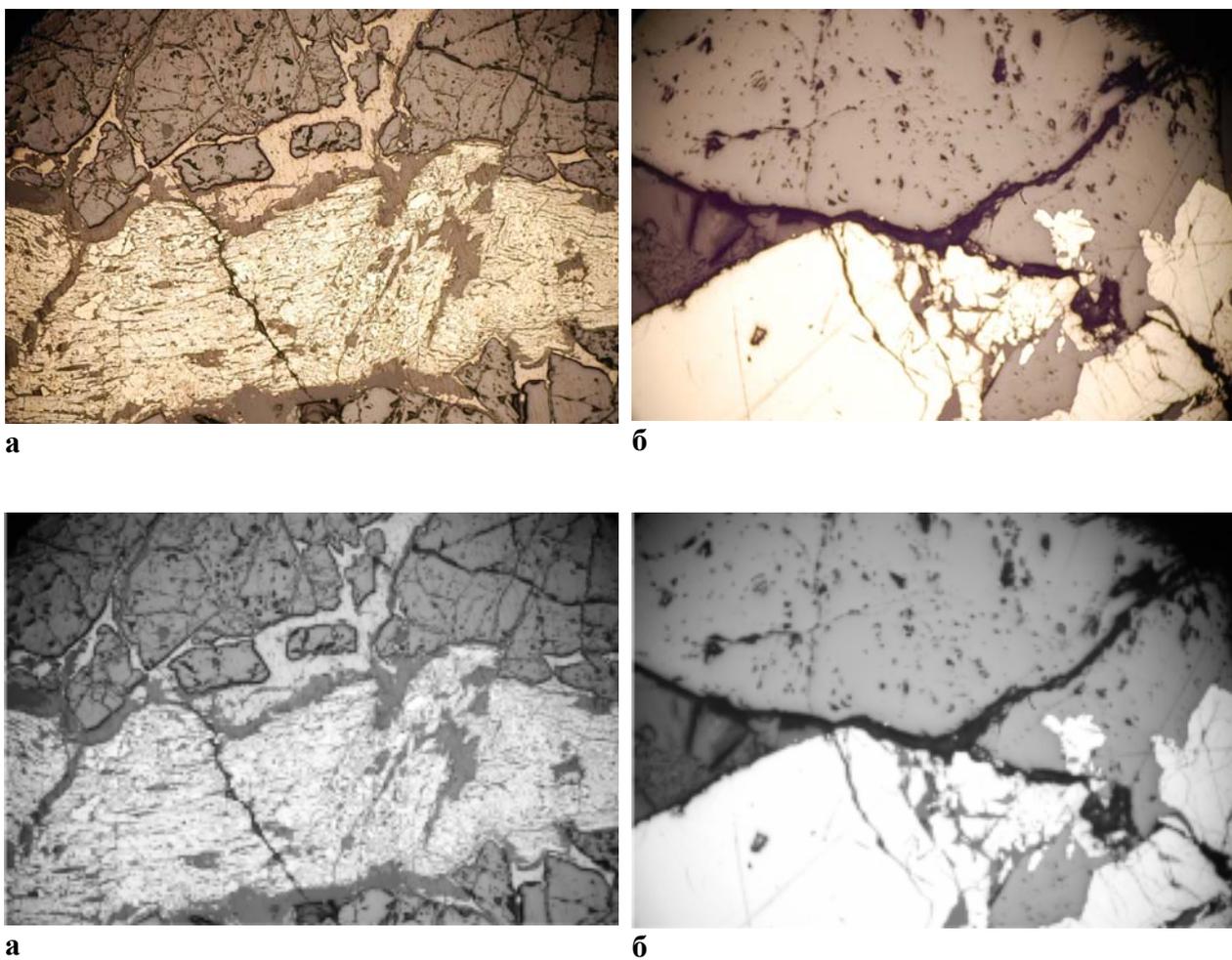
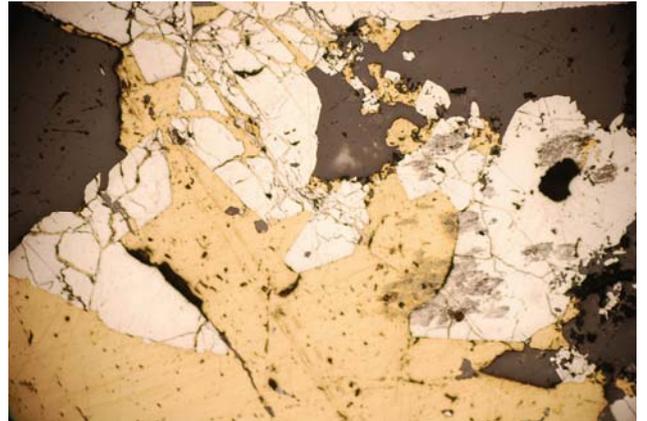


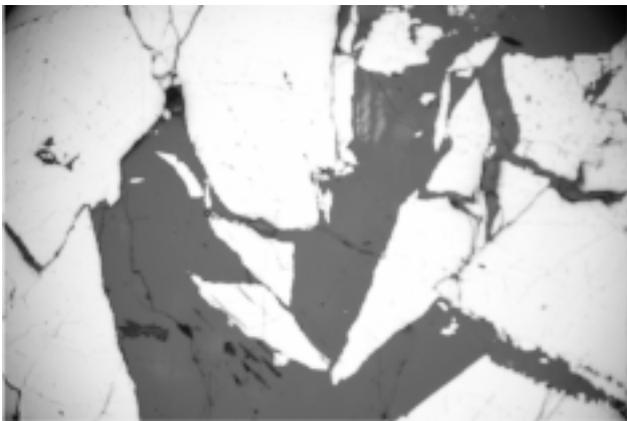
Рис. 1. а - идиоморфные выделения касситерита (темно-серый фототон), замещающегося сульфидами (светло-серый), б - срастание касситерита (темно-серый) и арсенопирита – (светло-серый)



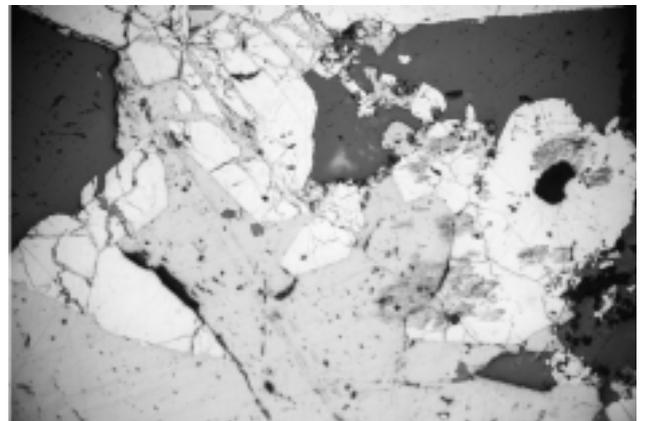
А



б

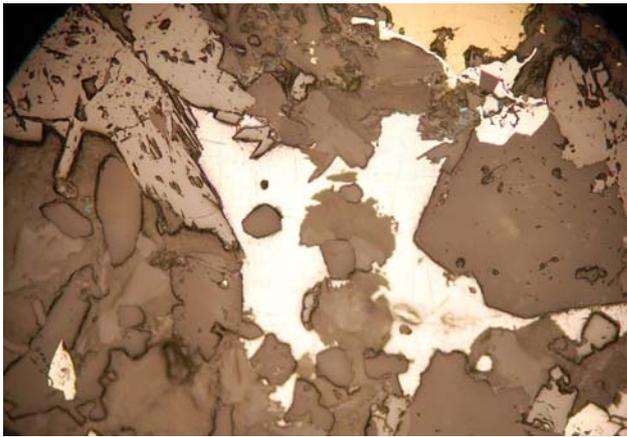


а

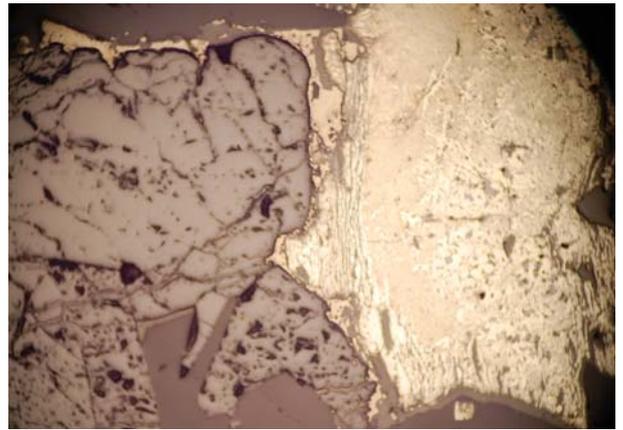


б

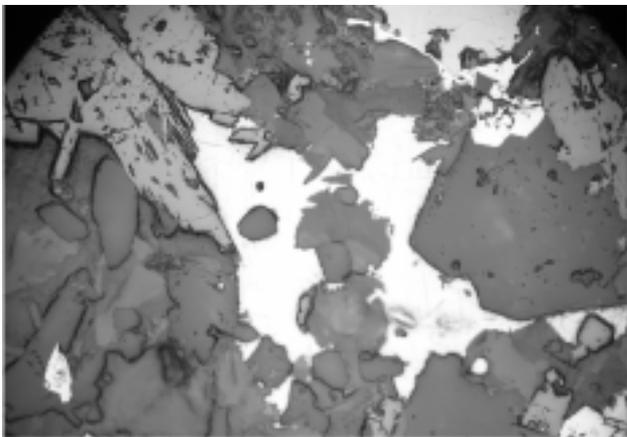
Рис. 2. а - раздробленные зерна арсенопирита (белый), кварц-касситеритовой стадии, б - замещение арсенопирита (белый), халькопиритом (светло - серый)



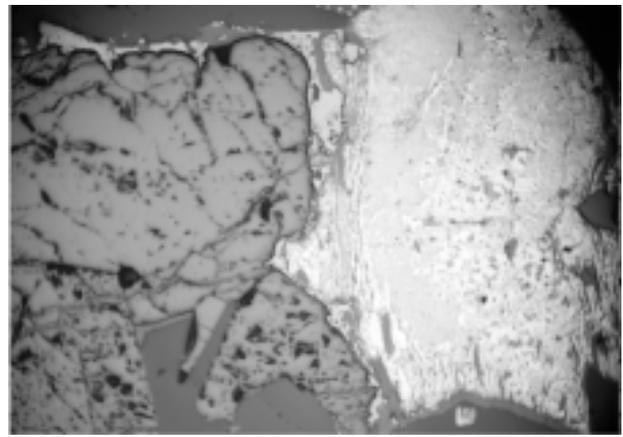
а



б



а



б

Рис. 3. а - лапчатые формы галенита (белый), б - реакционные каемки станнина (светло-серый) по периферии раздробленных зерен касситерита (темно-серый)