

**МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД ШЕЕЛИТОВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ СКРЫТОГО И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ОБОГАЩЕНИЯ
(ПРИМОРСКИЙ КРАЙ)**

Л.А. Саматова¹, В.И. Гвоздев², Л.А. Киенко¹, О.В. Воронова¹, В.А. Сорокина¹

¹Институт горного дела ДВО РАН, ул. Тургенева 51, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: Samatova@hg.febras.ru

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток,
690022; e-mail: gvozdev@fegi.ru

Поступила в редакцию 11 марта 2011 г.

Изучена малая технологическая проба, отобранная из керна скважин по рудному телу. Приведены данные по минеральному составу и структурно-текстурным особенностям руд месторождения. По результатам выполненных исследований, учитывающих специфику изученных руд (низкие концентрации вольфрама – WO_3 менее 0.5 %, высокие фосфора – P_2O_5 более 0.5 %; сульфидных минералов – не более 10 %), предлагается усовершенствование схемы обогащения руд месторождения Скрытое, разработанной ЗАО “Механобринжиниринг”. Это позволит повысить эффективность извлечения шеелита при обработке месторождения.

Ключевые слова: шеелитовые месторождения, минералогия, обогащение руд, флотация, Приморье.

ВВЕДЕНИЕ

Минерально-сырьевая база по вольфраму Дальнего Востока составляет около 23 % общероссийских запасов за счет месторождений в Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой области. Территория Приморского края – это один из перспективных регионов России, где известны вольфрамовые месторождения разных рудноформационных типов (грейзеновые – Тигриное, Забытое, скарновые – Восток-2, Лермонтовское и др.). В настоящее время эксплуатируются крупные скарновые шеелит-сульфидные месторождения, вопросы геологии, минералогии и генезиса которых подробно освещены в работах многих исследователей [3, 5–8, 11, 17, 18]. Схемы обогащения руд этих месторождений разработаны институтом МЕХАНОБР и успешно используются горнодобывающими предприятиями. Суть этих схем заключается в том, что в процессе флотации депрессируются апатит и кальцит, а шеелит извлекается в пенный продукт. Для эффективного разделения этих (кальцийсодержащих) минералов используется сложный технологический прием: высокотемпературная (85–90 °С) обработка минеральной смеси с

применением большого количества депрессоров (в основном жидкого стекла). Эта технология является сложной, энергоемкой и дорогостоящей.

Вопрос о возможности усовершенствования уже имеющейся схемы обогащения применительно к рудам с другой качественной характеристикой встал в связи с тем, что планируется переработка руд месторождения Скрытого на Приморской обогатительной фабрике предприятия ГРК “АИР” (Восток-2).

Скарновое шеелитовое месторождение Скрытое – один из интересных, мало изученных объектов Приморья, которое (по ресурсам более 50 тыс. т WO_3) готовится к отработке в ближайшее время. Особенность месторождения – штокверковый морфологический тип шеелитовой (малосульфидной) минерализации [5, 17].

**КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Месторождение Скрытое расположено в центральной части Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой области, в Малиновском рудном поле, примыкающем с запада по бассейну р. Малиновка к Центральному Сихотэ-Алинскому разлому.

По данным геологических исследований [5, 17], в строении месторождения принимают участие алевролиты, песчаники, туфопесчаники, базальты, спилиты и другие породы юрского возраста, среди которых встречаются блоки и пластины карбонатно-кремнистых пород (возраст, по аналогии с месторождениями Восток-2 и Лермонтовское – пермский). Это типичный разрез олистостромовой толщи, характеризующий Самаркинскую аккреционную призму [20]. Магматические породы на площади месторождения имеют подчиненное распространение. Среди них преобладают породы основного состава (межпластовые тела, часто залегающие согласно со слоистостью вмещающих пород: базальты, габбро, пироксениты и др.) юрского возраста; реже встречаются сильно измененные дайки кислого состава (гранодиориты, граниты, предположительно позднемелового возраста).

По результатам опробования на месторождении установлены три рудные зоны северо-западного простирания: Скрытая, Средняя и Прожилковая. В пределах зон выделено несколько пологопадающих горизонтов скарнированных карбонатно-кремнистых и вулканогенно-осадочных пород, в которых максимальные концентрации шеелита (до 5–10 %) приурочены к участкам их пересечения с прожилками кварц-полевошпат-шеелитового (иногда с карбонатом, апатитом и арсенопиритом) состава. Мощность скарнированных горизонтов от 0.6 до более 6.9 м; мощность прожилков – 2–3 см, редко превышает 5–6 см; мощность зон околожилльных метасоматитов близка к мощности прожилков. Максимальное скопление прожилков (до 7–10 на погонный метр) наблюдалось в рудной зоне Прожилковой. Минеральный состав рудных зон и их стадийность минералообразования достаточно детально рассмотрены в работах С.Г. Соловьева [17] и В.И. Гвоздева [5, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОБЫ ТП-5

Для исследований предприятием АИР была представлена технологическая проба ТП-5, отобранная из керна скважин по профилям 44–56 рудного тела № 9. Оптическое изучение вещественного состава пробы и структурно-текстурных особенностей метасоматических пород и руд было выполнено по более 100 полированным аншлифам и прозрачным шлифам. Редкие минералы дополнительно изучались на рентгено-спектральном микроанализаторе GEOL JXA-8100 с ЭДС производства Oxford Instruments, а их качественная диагностика осуществлялась на сканирующем электронном микроскопе EVO-50XVP с системой INCA Energy 350 производства Oxford Instruments.

Краткая характеристика вмещающих пород и околожилльных метасоматитов

В результате выполненных исследований по пробе ТП-5 было установлено, что в ней присутствуют такие же типы пород и установлена такая же последовательность их формирования. Рудная минерализация представлена прожилками (2–3 %) кварц-шеелитового состава с апатитом, полевым шпатом и рассеянной вкрапленностью сульфидных минералов (4–7 %) в интенсивно измененных вмещающих породах: кремнях, мраморах, гранат-карбонат-амфиболовых, плагиоклаз- и карбонат-амфиболовых сланцах, роговиках, пироксен- и пироксен-гранатовых скарнах, эпидотовых, полевошпатовых и тремолитовых метасоматитах и др. Типовые образцы руд показаны на рисунке А-Б.

Мраморы (2–3 %) состоят из кальцитовых бластозерен (0.1–1 мм), которые часто сильно катаклазированы, с множеством двойников давления; в небольшом количестве присутствуют кварц и единичные зерна бурого цвета (предположительно разложившего пироксена). По микротрещинам наблюдаются редкие скопления изометричной и пластинчатой формы, состоящие из пылевидного графита (?). По мраморам развиваются пироксеновые и пироксен-гранатовые скарны. Текстуры породы – равномерно-вкрапленная, массивная, участками пятнистая; структуры – гранобластозернистая, участками гранокластическая.

Кремни (30–35%) слагают зоны (до 2–3 см) среди мраморов. Они на 95 % представлены бластозернами кварца размером до 0.1 мм (гранобластовая структура, как у кварцитов). В скарнированных участках кремней встречаются редкие зерна (до 0.1–0.5 мм) пироксена изометричной формы и удлиненные пластинки тремолита. Вблизи кварцевых прожилков отмечается перекристаллизация кремнистых сланцев с образованием агрегатов, состоящих из субпараллельных, вытянутых, крупных (размером до 8 мм) зерен кварца. Границы кварцевых индивидов – фестончатые зубчатые; по их контакту часто развиваются мелкие (до 0.1 мм) зерна кварца. Этот кварц обычно переполнен включениями: реликты хлоритизированных и карбонатизированных пород, единичные зерна апатита (0.1 мм) или мусковита (развивается по микротрещинкам). Текстуры породы: массивная, участками полосчатая и линзовидная; структуры: гранобластовая, участками ориентированнобластозернистая, пойкилобластическая, реликтовая и др.

Сланцы (10–15 %) представляют собой породы со сланцевой, полосчатой, очковой текстурами, которые обусловлены чередованием зон разного (плаги-

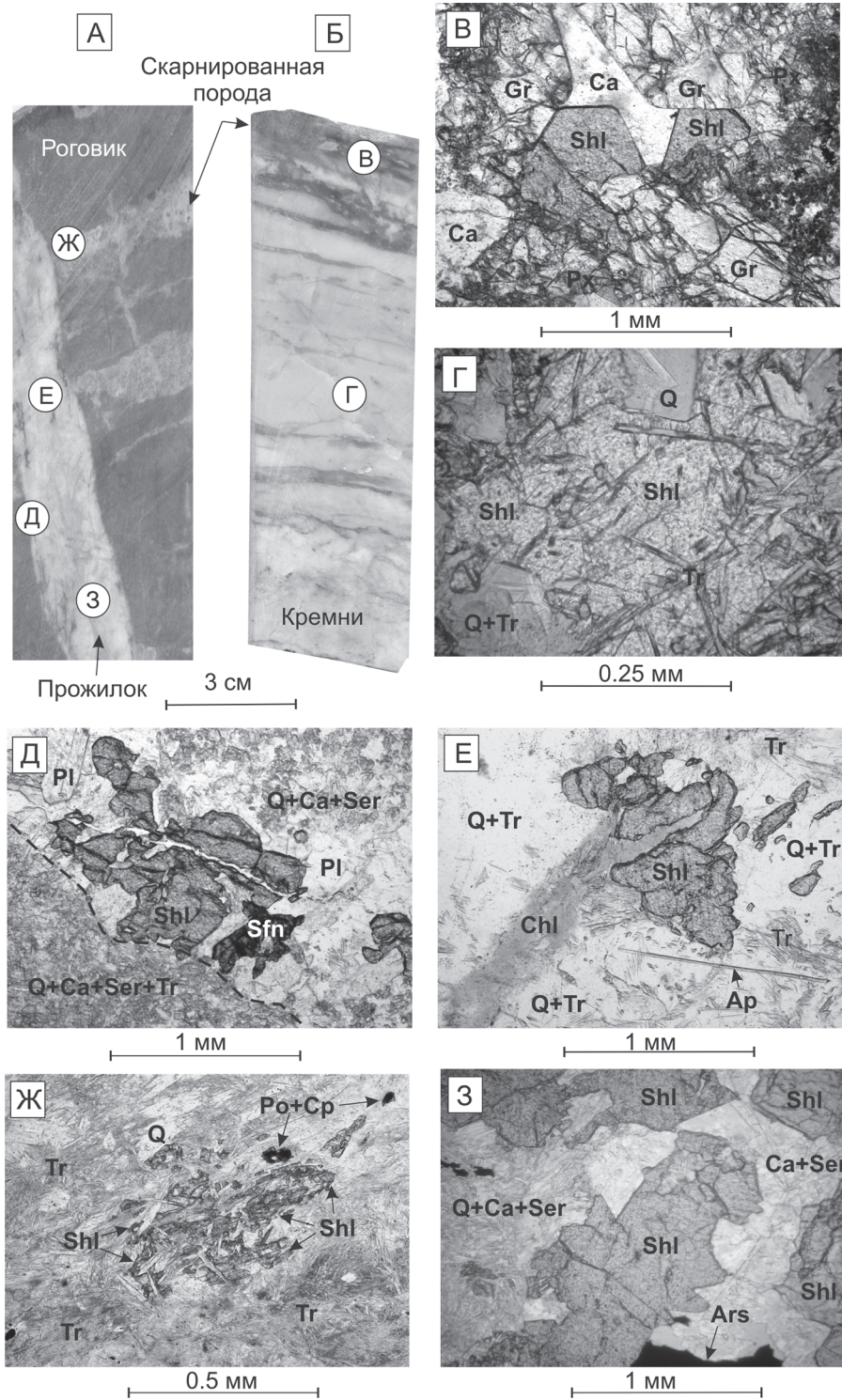


Рис. Типовые образцы керна из рудного тела № 9 (А-В) и характерные срastания шеелита (В-З) в рудах месторождения Скрытого.

Образцы керна: А – зоны скарнирования (серое), параллельные слоистости пород среди роговиков (темное) рассекаются прожилком кварц-полевошпат-шеелитового состава. В – чередование зон кремнистых (светло-серое) и скарнированных (серое, темно-серое) пород с серией микротрещин, выполненных кварцем, тремолитом и шеелитом. Буквы в кружках – места отбора шлифов, соответствуют нумерации фотографий.

Шлифы с характерными срastаниями шеелита: В – фрагмент скарнированного участка руд (пироксен-гранатовый скарн): реликты пироксена (Px), частично замещенного актинолитом и гранатом; центральная часть сложена октаэдрическими зернами граната (Gr) и идиоморфными – шеелита (Shl), интерстиции между которыми выполнены кальцитом (Ca); здесь и далее – николи П. Г – микротрещины в зерне шеелита, выполненные кварцем (Q) и тремолитом (Tr). Д – контакт вмещающих пород (показан пунктирной линией) с кварц-полевошпат-шеелитовым прожилком: ксеноморфные метазер-

на шеелита (Shl) и сфена (Sfn) развиваются по плагиоклазу (Pl), который практически полностью замещен криптокристаллическим агрегатом кварца, кальцита и серицита (Q+Ca+Ser); в шеелите наблюдаются микропрожилки, выполненные поздним кальцитом (белое); вмещающие породы сложены мелкозернистым агрегатом кварца, карбоната, серицита и тремолита (Q+Ca+Ser+Tr). Е – кварц-полевошпат-шеелитовый прожилок: раздробленные ксеноморфные зерна шеелита (Shl) корродируются хлоритом (Chl), тремолитом (Tr) и кварцем с включениями тремолита (Q+Tr) и апатита (Ap). Ж – Тремолитовый метасоматит (Tr) с шеелитом (Shl) и редкими вкрапленниками кварца (Q) и сульфидов: пирротина и халькопирита (Po+Cp). З – кварц-полевошпат-шеелитовый прожилок с арсенопиритом (Ars): ксеноморфные вкрапленники шеелита (Shl) (сложены более мелкими идиоморфными зернами) среди плагиоклаза, частично замещенного кварцем, карбонатом и серицитом (Q+Ca+Ser).

оклаз, флогопит, актинолит) состава. Структура пород – гранолепидофибробластовая, участками гранобластовая и ориентированнобластозернистая. В зонах серого цвета преобладают игольчатые, сноповидные, метельчатые, волокнистые (часто субпараллельно-ориентированные) агрегаты актинолита (размер 0.01–2 мм) и хлорита, реже наблюдаются гнезда с пластинками флогопита (0.01–0.1; мономинеральные линзы и полосы – 0.1–2 мм). В зонах светло-серого цвета преобладает плагиоклаз; в темно-серых – титаномагнетит и сфен (субпараллельные сланцеватости цепочки с рудным минералом 0.005–0.2 мм – пирит).

Участки скарнированных сланцев имеют гетеролепидофибробластовую структуру и линзовидно-полосчатую, сланцеватую текстуры, обусловленные разным минеральным составом зон. Здесь полосы и линзочки сложены призматическими зернами плагиоклаза, пироксена или микропорфиробластами амфибола и граната; лейкоксен, титаномагнетит, сфен и сульфиды слагают цепочки, параллельные сланцеватости породы.

Сланцы вдоль кварц-полевошпат-шеелитовых (с апатитом, арсенопиритом, пирротинном) прожилков сложены преимущественно (до 80 %) гетерогранобластовыми агрегатами кислого плагиоклаза (альбит-олигоклаз; до 0.5–0.7 мм) и более мелкими (менее 0.1 мм) зернами сфена и лейкоксена. В таких участках сланцев часто встречаются клиноцоизит (изометричные зерна 0.01–0.07 мм; иногда ассоциирует с рудным минералом – пиритом), карбонат, амфибол (тремолит-актинолит: зерна удлиненной формы, 0.01–0.1 мм, с гребенчатыми концевыми гранями), хлорит, апатит, сульфиды (0.02–0.3 мм; ксеноморфные вкрапленники пирротина и халькопирита; идиоморфные в виде ромбов – арсенопирита; микропрожилки мощностью 0.1–0.2 мм); линзы и гнезда кварц-кальцитового состава.

Роговики (5–7 %) в изученной технологической пробе встречаются редко. По минеральному составу среди них можно выделить два основных типа: кварц-полевошпат-биотитовые (по песчаникам, сланцам), кварц-полевошпат-амфибол-биотитовые (по породам с вулканогенной составляющей: базальтам, спилитам, туфопесчанникам и др.). Более детально они охарактеризованы в работе В.И. Гвоздева с соавторами [5].

Скарны и окоლოსкарновые породы в изученной пробе имеют подчиненное распространение (4–6 %). Это гнезда и линзы среди мраморов или жиллообразные тела мощностью 4–5 см среди ороговикованных пород и сланцев. По минеральному составу выделены скарны: гранатовые (с везувианом), пироксен-гранатовые и пироксеновые.

Гранатовые и пироксен-гранатовые скарны развиваются преимущественно по мраморам в форме линз и гнезд до 10–15 см; реже это прожилки мощностью первые сантиметры с хаотическим распределением основных породообразующих минералов. В центральной части линз и прожилков преобладает гранат и везувиан (изометричные зерна, 0.5–1.5 мм), которые часто замещаются клиноцоизитом и карбонатом. По периферии линзы и прожилки имеют пироксен-гранатовый состав. Минеральный состав скарнов колеблется в широких пределах: от мономинеральных гранатовых (более 90 % граната) до пироксен-гранатовых (более 30 % пироксена) разновидностей, иногда с плагиоклазом и кальцитом (более 25 %). В небольшом количестве присутствуют кварц, сульфиды, хлорит, апатит. Для пород характерна гранобластовая структура. Иногда в центральных участках зон гранатового состава наблюдаются идиоморфные метазерна шеелита (до 0.4 мм), сцементированные кальцитом (рис., В). Структура таких участков – гипидиоморфнометазернистая.

Пироксеновые скарны имеют подчиненное распространение. Они наблюдались в виде гнезд изометричной формы (1–2 см) или тонких (до 1 см) зон среди пироксен-плагиоклазовых окоლოსкарновых пород. Порода имеет светло-зеленую окраску, кристаллическое (0.1–1.3 мм) строение (метазернистая структура).

В прожилках кварц-пироксенового (часто с плагиоклазом) состава, локализованных среди роговиков, пироксен (салит) представлен идиоморфными зернами таблитчатой и призматической формы (от 0.07–1.1 мм); кварц (до 4–5 мм) выполняет промежутки между зернами диопсида; сфен образует микрозернистые агрегаты и зерна размером 0.15 мм. Пироксены замещаются кальцитом, игольчато-волокнистыми агрегатами актинолита. Мелкие зерна сульфидов (3–5 %) замещают пироксен, а более крупные – обрастают его, иногда образуя цементную структуру. Структура породы гипидиоморфнометазернистая, участками пойкилитовая; в жилах – гипидиоморфнометазернистая.

Окоლოსкарновые породы (скарноиды) – слагают внешние зоны скарновых образований, развиваясь по алюмосиликатным породам (роговикам, сланцам, кремням). Обычно это породы с линзовидно-полосчатой структурой, обусловленной чередованием полос разного состава: пироксен-плагиоклазового и амфибол-плагиоклазового.

Вблизи кварц-полевошпат-шеелитовых прожилков в скарноидах появляются участки, обогащенные эпидотом (клиноцоизитом), гранатом (до 1.5 мм), амфиболом (актинолит-тремолитом; шестоватые агре-

гаты с зернами от 0.05–0.1 до 0.4 мм), плагиоклазом, кварцем, кальцитом (0.1–1 мм), апатитом, шеелитом (изометричные зерна – 0.07–0.18 мм; футлярообразные – 0.02–0.42 мм.), сульфидами. Здесь сульфидные минералы выполняют интерстиции между зернами амфибола, образуя вкрапленники размером от 0.005 до 0.35 мм. В участках плагиоклазового состава часто наблюдается апатит, который имеет в сечениях изометричные или удлиненные формы зерен размером 0.1–0.85 мм. Текстуры пород – массивная, пятнистая, участками плейчатая; структура – гетерометазернистая.

Кварц-полевошпат-шеелитовые (с карбонатом) жилы встречаются во всех типах метасоматических пород. Главные минералы: кварц и плагиоклаз; постоянно присутствуют карбонат, апатит, реже – амфибол, калишпат (?), сульфиды (арсенопирит, пирротин, халькопирит, пирит и др.), хлорит, серицит. Плагиоклазы (альбит–андезин–лабрадор; зерна 0.1–0.5 мм; часто серицитизированы; рис., Д, З) совместно с апатитом (идiomорфные зерна до 0.8 мм) пространственно тяготеют к зальбандам жил. Кварц образует зерна изометричной формы (0.1–1.2 мм) и часто содержит пойкилитовые, идиоморфные вкрапления (до 0.1 мм) апатита. Карбонат образует агрегаты ксеноморфных, сдвойникованных (до 0.5–1.2 мм), шестоватых, копьевидных несдвойникованных (до 0.5 мм) кристаллов.

В контакте кварц-полевошпат-шеелитовых прожилков часто наблюдаются породы существенно (более 70 %) плагиоклазового состава (**плагиоклазиты**). Эти породы сложены зернами (0.3–4 мм) плагиоклазов кислого (альбит, олигоклаз) и среднего (андезин–лабрадор) состава, которые в разной степени замещены (иногда до полных псевдоморфоз) криптокристаллическим агрегатом мусковита, карбоната и кварца. Здесь также наблюдается большое количество апатита (отдельные зерна, скопления, цепочки зерен), имеющего изометричные, скелетные формы сечений (0.01–0.3 мм), и карбонатные прожилки мощностью от 0.02–0.6 до 3 мм. Рудные минералы представлены арсенопиритом, пирротином, халькопиритом (микрoзерна 0.25–0.3 мм), реже шеелитом (0.01–0.05 мм). В местах пересечения таких прожилков с зонами скарнирования в их составе часто присутствует тремолит, который наблюдается в виде игольчатых включений в кварце (рис., Е) и шеелите (рис., Г). По зонам скарнирования развиваются тремолитовые метасоматиты (35–40 %) с редкой вкрапленностью сульфидов. Шеелит в этих метасоматитах часто наблюдается в виде реликтов (рис., Ж).

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД

В рудах изученной пробы ТП-5 главный полезный (извлекаемый) минерал – шеелит (0.3 %); сульфидные минералы составляют 3 % (по месторождению – не более 10–15 %). Среди сульфидов преобладают арсенопирит (1.4 %) и пирротин (0.7 %); менее распространены пирит, марказит (в сумме 0.6 %), халькопирит (0.2 %), сфалерит (0.1 %). В пробе встречаются единичные зерна касситерита, магнетита, вольфрамита, молибденита, галенита, минералов висмута (самородный висмут, висмутин, сульфотеллуриды висмута группы жозеита и др.), лейкоксена, сфена, циркона, минералов зоны окисления (скородит, Fe-оксиды, церрусит). Из породообразующих минералов в изученной пробе преобладают карбонат (32 %), амфибол, хлорит и пироксен (в сумме 17 %), слюда (мусковит, серицит, биотит, флогопит – в сумме 5.4 %), кварц (4.0 %), полевые шпаты (1.8 %), апатит (1 %), гранат, везувиан и эпидот (в сумме 0.5 %). Кроме этого в пробе присутствует много сростков перечисленных выше минералов, количество которых составляет 35 %. Химический состав и результаты рентгено-флуоресцентного анализа (табл. 1) пробы ТП-5 характеризуют ее как бедные вольфрамовые руды, которые по петрографическим особенностям условно можно отнести к шеелит-кварц-амфиболовому типу.

Шеелит – наблюдается в виде идиоморфных зерен (до 0.9 мм; рис., В), а также агрегатов (до 3.8 мм) среди скарнированных пород и околожилных метасоматитов. В кварцевых прожилках шеелит образует агрегаты (рис., З), сложенные идиоморфными зернами, размер которых колеблется от десятых долей до 1.2 мм. Шеелит совместно с плагиоклазом, сфеном, арсенопиритом и апатитом часто пространственно тяготеет к зальбандам прожилков (рис., Д). В околожилных метасоматитах шеелит обычно имеет ксеноморфный облик (рис., Д) и иногда корродируется хлоритом (рис., Е) и тремолитом (рис., Ж). Размеры его вкрапленников редко превышают 1 мм, а зерен – 0.02 мм.

Пирротин – наиболее распространенный минерал среди сульфидов. Он образует вкрапленники, прожилковидные (0.1–0.5 мм) и линзовидные скопления ксеноморфного облика с аллотриоморфнозернистой и метазернистой структурами. Пирротин находится в тесном сростании с арсенопиритом, сфалеритом, халькопиритом, пиритом. Иногда пирротин замещается криптокристаллическим агрегатом пирита, магнетита, марказита и мельниковита, образующих коррозионные скелетные, решетчатые и реликтовые структуры. Во вмещающих сланцах и рогови-

Таблица 1. Химический анализ (А) руд и результаты рентгено-флуоресцентного анализа (Б) пробы ТП-5.

А																		
Компонент, %		WO ₃	CaCO ₃	Cu	P	P ₂ O ₅	As	S										
		0.25	7.30	0.05	0.28	0.64	0.31	2.03										
Б																		
Компонент, %		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	п.п.п.	Сумма	S	Cl			
		49.86	1.43	12.97	9.72	0.21	5.55	10.87	1.83	1.53	0.39	4.75	99.01	1.193	0.004			
Эл-т, г/г		V	Cr	Co	Ba	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	As	Pb	Th	U
		199	232	35	508	111	145	136	19	178	245	24	109	14	2443	9	2	1

Примечание. Анализы выполнены: химический анализ в ИГД ДВО РАН, аналитик Л.Н. Плюшина; рентгено-флуоресцентный анализ на сканирующем спектрометре S 4 Pioneer (Bruker FXS, Германия) в аналитическом центре ДВИГ ДВО РАН, аналитик Е.А. Ноздрачев.

как пирротин совместно с магнетитом и сфеном образует вкрапленность, ориентированную параллельно слоистости пород. Иногда вокруг пирротина наблюдаются скопления сидерита.

Арсенопирит – второй по распространенности сульфидный минерал. Он встречается преимущественно в кварц-полевошпат-шеелитовых жилах и сопровождающих их околожильных метасоматитах, пространственно тяготея к зальбандам. В жилах арсенопирит образует вкрапленники (до 2 см), сложенные идиоморфными зернами до 1.1 мм, иногда с секториальными двойниками. Этот арсенопирит часто раздроблен микропрожилками с кварцем, карбонатом, хлоритом, пирротинном, халькопиритом и сфалеритом. В околожильных метасоматитах арсенопирит наблюдается в виде более мелких (0.1–0.4, реже до 1 мм) идиоморфных метазерен, иногда гипидиоморфных агрегатов (до 0.8 мм) зерен с ромбовидной формой сечений. Структуры таких участков: гипидиоморфнометазернистая, метазернистая и порфирометазернистая; текстуры: массивная, прожилковая, микропрожилковая, вкрапленная.

Пирит – распространенный минерал в рудах. Наблюдалось две его генерации. Первая встречается в прожилках с сидеритом (идиоморфные зерна в сростании с халькопиритом и сфалеритом); вторая – в участках руд с дисульфидизированным пирротинном (крупные порфиновые идиоморфные метазерна размером до 1.4 мм, иногда с микровключениями сфалерита и халькопирита размером до 0.04 мм).

Марказит образует агрегаты (до 0.3 мм) изометричной формы, игольчатую вкрапленность и нитевидные прожилки в сульфидах и во вмещающих породах. Размер зерен не превышает десятых долей миллиметра. Марказит совместно с мельниковитом, хлоритом, кварцем замещает пирротин, реже развивается по арсенопириту и, в свою очередь, корродируется карбонатом.

Халькопирит образует две генерации. Более ранний халькопирит образует эмульсионные вкрапленники (менее 0.02 мм) в сфалерите. Поздний халькопирит (до 0.1 мм) наблюдается в сростаниях с пирритом, пирротинном, выполняя интерстиции между зернами амфибола и хлорита (?), иногда образует каемки вокруг сфалерита или микропрожилки и гнезда (до 1–2 мм) в нерудной массе.

Сфалерит образует ксеноморфные зерна размером 0.03–0.05 (до 0.1) мм. Он часто находится в сростках с халькопиритом и пирротинном, которые иногда наблюдаются в нем виде мелких эмульсионных вкрапленников, образуя структуры распада твердого раствора. Сфалерит корродируется нерудными минералами карбонатом, хлоритом и кварцем.

Молибденит встречается редко. Он образует мелкие листовидные чешуйки или волокнисто-шестоватые агрегаты (до 0.07 мм) по границам зерен и микротрещинам кварца.

Сопутствующие минералы, такие как галенит, самородный висмут, сульфиды (икунолит, висмутин) и сульфотеллуриды (жозеит-А) висмута, свинцово-висмутовые сульфосоли лиллианит-густовитовой серии (густавит, ширмерит, трежерит и др.), встречаются в изученной пробе крайне редко. Они детально охарактеризованы в работе В.И. Гвоздева [7], а их присутствие в технологической пробе (единичные находки) не может принципиально повлиять на разработку схемы обогащения руд.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

В изученной пробе ТП-5 месторождения Скрытого по текстурно-структурным особенностям преобладают руды, которые могут быть отнесены к благоприятно обогатимым [9]. По минеральному составу (в отличие от руд месторождений Восток-2 и Лермонтовского) изученные руды являются малосульфидными (менее 5 % сульфидных минералов), более мелкозернистыми (агрегаты зерен шеелита редко превышают 1 мм; преобладают зерна размером менее 0.2 мм), часто со сложными минеральными прорастаниями, неблагоприятными для их обогащения (интенсивное замещение рудных минералов нерудными, наличие структур разведания, скелетных, решетчатых, реликтовых) (рис.). Количество руд с тонкими прорастаниями составляет ориентировочно 10–15 % от общего объема.

Подготовка пробы к минералогическому анализу была выполнена по существующей методике: отобрана навеска 500 г и “мокрым” способом проведен рассев на классы: +1.0; 1.0+0.5; -0.5+0.25; -0.25+0.1; -0.1+0.074; -0.074 +0.044; -0.044 мм. Классы, полученные в результате отсева (кроме -0.044 мм), были разделены в бромформе (плотность – 2.89 г/см³) на фракции: тяжелую – > 2.9 г/см³ и легкую – < 2.9 г/см³. В тяжелой фракции сначала была выделена магнитная фракция (РМЧ), а затем на магните “Сочнева” – три электромагнитные фракции. Кроме этого, по две электромагнитные фракции выделены в классе -0.5+0.25 мм. Оставшийся материал представляет собой немагнитную фракцию. Все фракции были изучены под бинокулярным микроскопом (МБС-10) с использованием микрохимических реакций и иммерсионных жидкостей (табл. 2).

Установлено, что в классе +1мм сростки состоят из породообразующих минералов (пироксенов, амфиболов, карбонатов и др.), сульфидов и единич-

ных зерен шеелита. В классе -0.1+0.5 мм шеелит встречается в сростках с сульфидами (пирротинном, арсенопиритом, халькопиритом и др.), кварцем, амфиболом; реже наблюдаются включения шеелита (размером 0.1·0.1 мм) в кварце. Отмечаются также сростки сульфидов – пирита, марказита, халькопирита, арсенопирита, пирротина. Следует отметить, что в классах +1мм и -1+0.5 мм содержания шеелита и апатита рассчитаны по химическому анализу (средневзвешенные), так как эти минералы находятся преимущественно в сростках, а в свободном виде встречаются их единичные зерна. Частичное раскрытие минералов имеет место в классе -0.5–0.25 мм, а практически полное – в классе -0.074 мм. Учитывая это, рекомендуемая степень измельчения руды не должна быть менее -0.16 мм (70–75 % кл. -0.08 мм). Гранулометрическая характеристика измельченного материала и распределение в нем компонентов по классам крупности приведены в таблице 3.

Технологическая сложность обогащения таких руд обусловлена как их текстурно-структурными особенностями, так и необходимостью разделения в процессе флотации трех кальциевых минералов (шеелита, апатита и кальцита), обладающих близкими физико-химическими и флотационными свойствами. При измельчении пробы на поверхности этих минералов вскрывается общий для них катион Ca²⁺, причем в элементарной ячейке катионы металла расположены на внешних гранях, а анионы сдвинуты в ее внутреннюю часть. Наибольшую трудность представляет разделение апатита и шеелита, которые, помимо общего катиона, имеют близкие размеры анионов PO₄³⁻ и WO₄²⁻. Адсорбция реагента-собирателя на поверхности минеральных частиц происходит за счет взаимодействия химически активного катиона кальция с анионной частью молекулы собирателя, образуя нерастворимую кальциевую соль. Поэтому кальциевые минералы, обладающие равной адсорбционной активностью, приобретают и равную возможность флотироваться.

Проблеме селективного разделения кальциевых минералов посвящено множество работ, на основе которых разработаны и используются в промышленных условиях технологии их обогащения [1, 2]. На вольфрамдобывающих предприятиях Приморья в процессе флотации депрессируются апатит и кальцит, а шеелит извлекается в пенный продукт. Для достижения эффективного разделения кальциевых минералов применяется метод Петрова: высокотемпературная обработка черного концентрата (85–90°C) в сочетании с большим количеством депрессоров, в основном, жидкого стекла (45–60 кг/т) [12]. После этого и последующих операций доводки уда-

ется получить кондиционные концентраты, в которых содержания фосфора строго лимитируются.

Как показывает практика обогащения апатитсодержащих шеелитовых руд месторождений Лермонтовское и Восток-2, соблюдение этих кондиций по содержанию вредных примесей (фосфора) при повышенных содержаниях в них апатита практически невозможно. Если на Приморской фабрике проблему в определенной мере удается решить шихтовкой руды, то при переработке руд Лермонтовского месторождения, где апатит присутствует практически во всех типах руд (особенно в грейзеновых), соблюдение кондиций является актуальной проблемой, требующей поиска и выявления новых, высокоселективных собирателей [19].

Для решения задачи селективной флотации было проведено изучение условий достижения избирательной адсорбции реагентов на поверхности кальциевых минералов и выявление из них наиболее селективнодействующих.

Первоначально исследования были проведены на мономинеральных фракциях апатита, шеелита и кальцита, их искусственных смесей с применением разных собирателей (смесей из групп карбоновых, фосфоновых кислот и их солей, алкил-арилсульфонатов, ацилированных аминокислот и др.). На минеральной смеси апатит–кальцит было установлено, что при использовании в качестве собирателя флотола-7,9 (смесь 1-оксиалкилиден-1, 1-дифосфоновых кислот) и аспарала-Ф (тетранатриевая соль N-n-октадецил-N-сульфосукциноиласпарагиновой кислоты), прежде всего, достигается активное взаимодействие реагентов с апатитом, тогда как адсорбционная активность по отношению к кальциту остается низкой. Это позволяет сделать вывод о перспективности выбранных реагентов для флотации апатита из карбонатсодержащих руд. При использовании этих же собирателей в экспериментальном изучении смеси апатит–шеелит было установлено, что интенсивность их взаимодействия с апатитом также значительно выше, чем с шеелитом. Следует отметить, что используемые при исследовании собиратели (в особенности флотола-7,9) обеспечивают достаточно высокую селективность флотации апатита как из его искусственных, так и природных смесей с разными кальциевыми минералами в широком диапазоне pH среды, что указывает на стабильность этого процесса. Однако ранее нами были получены лучшие результаты в слабощелочной (традиционно применяемой) среде, где из смеси монофракций шеелита и апатита извлечение апатита в пенный продукт составило ~ 90 %; в камерном продукте оставался шеелит с извлечением того же порядка [10].

Выявленные закономерности подтвердились и в экспериментах, выполненных на разных типах руд обоих месторождений – Лермонтовского и Восток-2. Первоначально была разработана технология выделения апатита в самостоятельный продукт из хвостов доводки шеелитовых концентратов. При этом переработка высокофосфористых руд из хвостов их доводки дает возможность получать апатитовый концентрат, пригодный для переработки на удобрения, а в случае обогащения карбонатного типа руд – получение фосфатизированных карбонатных продуктов для карбонатизации кислых почв [13]. Однако этим не решалась проблема получения товарной продукции, кондиционной по вредным примесям, при переработке высокофосфорных руд. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на выявление оптимальных условий выделения апатита в “голове” схемы переработки, т.е. разработку технологии обесфосфоривания питания шеелитовой флотации [14]. Необходимо отметить, что в этом случае имеют место определенные потери шеелита с апатитовым продуктом, обусловленные сложными взаимоотношениями минералов, которые необходимо будет компенсировать большей эффективностью последующей флотации шеелита.

Традиционно флотация шеелита на Приморской обогатительной фабрике осуществляется в содовой среде при pH 9.3–9.5, где в качестве собирателя используется олеиновая кислота. Экспериментально было установлено, что при снижении pH (до 6.5–5.0) среды активность флотации шеелита падает. Следовательно, при обесфосфоривании это может обеспечить наиболее низкие потери вольфрама с апатитом, но отрицательно скажется на последующем шеелитовом цикле.

Исходя из этого, для обесфосфоривания питания шеелитового цикла был принят простейший реагентный режим: дозирование соды (0.5÷0.75 кг/т) и подача собирателя в “голодном” режиме. При этом предпочтение отдано аспаралу-Ф в связи с тем, что это реагент отечественного производства (з-д “ИВХИМПРОМ”, г. Иваново). Производство флотола-7,9 в нашей стране пока не налажено, ранее он выпускался Павлодарским химзаводом (Казахстан) [15, 16].

Разработанная авторами технология селективного разделения минерального комплекса апатит–шеелит–кальцит (по которой вначале извлекается апатит, а затем, по существующей на предприятии схеме обогащения, – шеелит) представляет интерес как для руд с повышенным содержанием фосфора

Таблица 2. Количественный минералогический состав пробы ТП-5 по классам и фракциям.

Клас-сы, мм	Фракции	Выход, %		Содержание, %																						
		от класса	от руды	Shl	Ap	Pyr	Ars	Py	Chp	Sf	Sn	Wf	Amf. Px	Fe-ок	Pl	Grt, Vz	Er	Mu	Ca	Q	Срост**					
+1*	Магнитная	0.05	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-			
	Эл. магн. I	27.9	6.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	5	93		
	Эл. магн. II	2.96	0.67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	98		
	Эл. магн. III	6.5	1.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	90		
	Немагнитная	7.7	1.73	1.7	8	ед.	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.7	8	12	68	
Легкая	54.98	12.30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	15	7	70	
Итого	100	22.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-1 +0.5*	Магнитная	0.14	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	
	Эл. магн. I	35.66	7.62	-	-	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	2	-	93	
	Эл. магн. II	4.00	0.85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	97	
	Эл. магн. III	5.07	1.08	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	4	-	93	
	Немагнитная	14.77	3.16	1	4	-	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3	35	10	49	
Легкая	40.36	8.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	50	12	30	
Итого	100	21.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-0.5	Магнитная	0.35	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	
	Эл. магн. I	26.96	4.5	-	-	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	5	-	90	
	Эл. магн. II	15.81	2.62	-	-	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	10	9	72	
	Немагнитная	18.12	3.02	1.2	3	-	4	1	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	38	18	26	
	Легкая	38.76	6.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	60	8	10
Итого	100	16.66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-0.25	Магнитная	1.8	0.18	-	-	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Эл. магн. I	16.09	1.68	-	-	5	2	-	-	-	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59	-	-	-
	Эл. магн. II	10.13	1.05	-	-	0.3	0.4	-	-	-	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	10	-	63	
	Немагнитная	8.26	0.86	3.3	10	0.3	10	5	1	ед.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	5	45	24	
	Легкая	63.72	6.62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	1	44	5	ед.
Итого	100	10.39	ед.	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	74	4	1	-	

Примечание. Прочерк – минерал не установлен; ед – присутствуют единичные зерна. Принятые сокращения минералов: Shl – шеллит, Ap – апатит, Py – пирротин, Arс – арсенопирит, Py – пирит, Chp – халькопирит, Sf – сфалерит, Sn – касситерит, Wf – вольфрамит, Amf – амфиболы, Px – пироксены, Fe-ок. – оксиды железа, Pl – полевые шпаты, Grt – гранат, Er – эпидот, Mu – слюды, Ca – кальцит, Q – кварц; * – в классах +1 и -1+0.5 содержание шеллита и апатита дано средневзвешенное по химическому анализу; срост.** – сростки сульфидов, амфиболов, пироксенов, кварца, полевых шпатов; электромагнитная фракция III есть только в классах +1 и -1+0.5. Анализы выполнены в ИГД ДВО РАН на бинокулярном микроскопе МБС-10, минералогических микроскопах ПОЛАМ-Р-312 и ORTHOLUX (Лейтц, Германия), минералог В.А. Сорокина.

Таблица 3. Гранулометрическая характеристика и распределение компонентов по классам крупности при измельчении до -0.16 мм.

Классы крупности	Выход, %	Содержание, %			Распределение, %		
		WO ₃	P	CaCO ₃	WO ₃	P	CaCO ₃
+0.16	3.2	0.16	0.2	8.6	1.89	6.05	2.24
-0.16+0.08	22.6	0.2	0.06	11.4	16.91	12.98	21.27
-0.08+0.044	18.5	0.2	0.07	11.5	13.85	12.4	17.65
-0.044+0.015	27.0	0.37	0.17	12.6	37.37	43.92	28.13
-0.015	28.7	0.28	0.09	13.8	29.98	24.65	30.71
Итого кл. -0.08	74.2	0.29	0.11	12.5	81.2	80.97	76.49
Руда	100	0.27	0.10	12.1	100	100	100

Примечание. Химические анализы выполнены в ИГД ДВО РАН на фотометре КФК-3 и спектрометре рентгенометрическом многоканальном СРМ-18, аналитик Л.Н. Плюснина.

Таблица 4. Результаты флотации шеелита из исходной руды месторождения Восток-2 (проба МТ-25.5-2) и обесфосфоренного питания.

№ оп.	Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %		Условия опыта
			P ₂ O ₅	WO ₃	P ₂ O ₅	WO ₃	
1	Апатитовый концентрат	1.45	14.56	1.69	32.29	3.83	Апатитовая флотация: собиратель – аспарал-Ф
	1-2 апатитовый промпродукт	7.17	1.78	0.82	19.53	8.18	
	Итого черновой апатитовый продукт	8.62	9.93	0.97	60.44	12.01	Шеелитовая флотация: собиратель – олеиновая кислота
	Черновой шеелитовый концентрат	4.90	1.84	9.60	13.79	74.47	
	Хвосты	86.48	0.26	0.10	34.39	13.52	
	Питание шеелитовой флотации	91.38	0.34	0.62	48.18	87.99	
	Руда	100.00	0.67	0.64	100.00	100.00	
2	Черновой шеелитовый концентрат	10.00	2.95	4.75	44.67	75.31	Шеелитовая флотация: собиратель – олеиновая кислота
	Пром. продукт	4.22	1.55	0.44	9.90	2.94	
	Хвосты	85.78	0.35	0.16	45.44	21.75	
	Руда	100.00	0.66	0.63	100.00	100.00	

центрации 15) против 4.75 (степень концентрации 7.5) без операции обесфосфоривания. При этом из питания шеелитовой флотации получен апатитовый концентрат с содержанием 14.56 % P₂O₅ с извлечением 32.29 %. Присутствие в апатитовом продукте незначительного количества шеелита обусловлено не только близкими флотационными свойствами этих минералов, но и их тонкими взаимопрорастаниями (пойкилитовые вкрапления апатита в шеелите). Таким образом, питание шеелитовой флотации обложено не только за счет снижения в руде содержания апатита до 0.34 % P₂O₅ (0.15 % P) против 0.67 % P₂O₅ (0.29 % P), но и за счет удаления тонких шламов.

На основе полученных результатов были проведены опыты на пробе (ТП-5) руды месторождения Скрытого – более бедной по содержанию WO₃ (0.25 %). Здесь для повышения содержания WO₃ в исходной руде до 0.6–0.7 % (как в бедных рудах месторождения Восток-2) может быть рекомендовано включение в схему обогащения дополнительной операции – радиометрической сепарации дробленной руды (разработка ЗАО “Механобринжиринг”). Результаты шеелитовой флотации с предварительным обесшламливанием руды и без него приведены в таблице 5.

В опыте 1 (по описанному выше реагентному режиму флотации) в черновой апатитовый продукт с

Таблица 5. Результаты флотации шеелита из исходной руды месторождения Скрытое (проба ТП-5) и обесфосфоренного питания.

№ оп.	Наименование продукта	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %		Условия опыта
			P ₂ O ₅	WO ₃	P ₂ O ₅	WO ₃	
1	Апатитовый концентрат	1.74	14.06	0.69	38.11	4.54	Апатитовая флотация: собиратель – аспарал-Ф
	1-2 апатитовый промпродукт	11.40	1.81	0.21	32.14	9.05	
	Итого черновой апатитовый продукт	13.14	3.43	0.27	70.25	13.59	
	Черновой шеелитовый концентрат	11.77	0.92	1.75	16.87	77.91	Шеелитовая флотация: собиратель – олеиновая кислота
	Хвосты	75.09	0.11	0.03	12.88	8.50	
	Питание шеелитовой флотации	86.86	0.22	0.26	29.75	86.41	
	Руда	100.00	0.64	0.26	100.00	100.00	
2	Черновой шеелитовый концентрат	22.78	1.91	0.88	68.42	81.03	Шеелитовая флотация: собиратель – олеиновая кислота
	Хвосты	77.22	0.26	0.06	31.58	18.97	
	Руда	100.00	0.64	0.25	100.00	100.00	

содержанием 3.43 % P₂O₅ извлечение апатита составило 70.25 %, при потерях с ним WO₃ 13.59 %. Двумя последующими операциями качество продукта было повышено до 14.06 % P₂O₅, а его извлечение составило 38.11 % при потере WO₃ 4.54 %.

В процессе флотации шеелита из обесфосфоренного питания (0.22 % P₂O₅ против 0.64 % в исходной руде) в черновой шеелитовый концентрат с содержанием 1.75 % WO₃ (степень концентрации 6.7) извлечение шеелита составило 77.91 %, а содержание в нем P₂O₅ – 0.92 %, при извлечении 18.67 %. Потери триоксида вольфрама не превысили 8.5 %.

В опыте 2, при флотации шеелита без операции предварительного обесфосфоривания, селективность процесса отсутствует. Здесь в черновой концентрат (WO₃ 0.88 %) извлечение шеелита составило 81.3 %, при этом содержание P₂O₅ в продукте – 1.91 % (0.83 % P), при извлечении апатита в продукт 68.42 %. В то же время, потери вольфрама с отвальными хвостами вдвое выше и составляют 18.97 % WO₃ (против 8.5 в опыте 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение технологической пробы ТП-5 позволяет сделать следующие выводы.

– Представленная проба шеелитовой руды является весьма бедной по содержанию шеелита (0.3 %) и сульфидов (менее 3 %), но отличается несколько повышенным содержанием апатита (1 % или 0.46 % P₂O₅), который присутствует в рудах всех известных шеелитовых месторождений Приморья.

– Основные концентрации шеелита сосредоточены в кварц-полевошпат-шеелитовых прожилках (с карбонатом, апатитом, арсенопиритом, амфиболом), оперяющих эти прожилки микротрещинах и околожильных метасоматитах. Наиболее предпочтительны участки пересечения этих прожилков с пологопадающими горизонтами ороговикованных, а затем скарированных карбонатно-кремнистых пород.

– Шеелиты изученной пробы ТП-5 характеризуются тонкой вкрапленностью (преобладают зерна менее 0.2 мм) и тонкими сложными сростаниями с породообразующими минералами (широко распространены структуры разъедания, скелетные, решетчатые, реликтовые, пойкилитовые), что определяет высокую сложность процесса обогащения руд.

– С учетом гранулометрических характеристик руды для достижения необходимой степени раскрытия шеелита рекомендовано ее измельчение до фракции -0.16 мм (70–75 % класса -0.08 мм).

– Для получения кондиционных концентратов из бедных шеелитовых руд рекомендуется введение в существующие схемы обогащения предварительной флотации (обесфосфоривания питания) апатита, позволяющего реализовать шеелитовый цикл более эффективно: с минимальными потерями WO₃ и низкими концентрациями P₂O₅.

– Низкие концентрации сопутствующих компонентов (Cu, Bi, Mo, Pb, Sn, Zn) и крайне рассеянная вкрапленность их минералов (халькопирита, самородного висмута, висмутита, касситерита, галенита, сфалерита и др.) в рудах свидетельствуют о нецеле-

сообразности их последующего извлечения в отдельный продукт.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО № 09-2-СУ-08-002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов Р.Я., Никифоров К.А., Мохосоев М.В. Селективная флотация флюорит-карбонатных руд. Новосибирск: Наука, 1983. С. 52–82.
2. Барский Л.А., Кононов О.В., Ратмирова Л.И. Селективная флотация кальцийсодержащих минералов. М.: Недра, 1979. 232 с.
3. Гвоздев В.И. Минеральные ассоциации и генезис Лермонтовского скарново-шеелитового месторождения: Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 1984. 20 с.
4. Гвоздев В.И. Скарны шеелит-сульфидных месторождений Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 1. С. 55–69.
5. Гвоздев В.И., Орехов А.А. Метасоматические породы и генезис шеелитового месторождения Скрытое (Приморье) // Геология руд. месторождений. 2004. Т. 46, № 6. С. 540–551.
6. Гвоздев В.И., Цепин А.И. Висмутовая минерализация в рудах месторождения Восток-2 // Геология руд. месторождений. 2005. Т. 47, № 2. С. 148–163.
7. Гвоздев В.И. Висмутовая минерализация в рудах шеелитового месторождения Скрытое и вопросы его генезиса (Приморский край, Россия) // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 1. С. 72–83.
8. Иванов Ю.Г. Геохимические и минералогические критерии поисков вольфрамового оруденения. М.: Недра, 1974. 113 с.
9. Исаенко М.П. Определитель текстур и структур руд. М.: Недра, 1964. 156 с.
10. Киенко Л.А., Саматова Л.А., Воронова О.В., Плюснина Л.Н. Перспективы создания новых технологий обогащения вольфрамовых руд на основе теоретических и экспериментальных исследований по разделению кальцийсодержащих минералов // Добыча и переработка минерального сырья Дальнего Востока / Сб. ИГД ДВО РАН, Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 229–232.
11. Кудрин В.С. Тектонические и структурно-геологические критерии прогнозной оценки скарновых месторождений вольфрама // Критерии прогнозной оценки скарново-шеелитовых месторождений. М.: ОЭП ВИМС, 1985. С. 7–17.
12. Петров Н.С. Флотация шеелита из скарновых руд // Бюлл. Механообра. 1956. № 1.
13. Саматова Л.А., Киенко Л.А., Воронова О.В. Флотация апатита из карбонатно-апатитовых отходов переработки вольфрамовых руд месторождений Приморья // Научно-технические проблемы освоения минеральных ресурсов на Дальнем Востоке / Сб. ИГД ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 243–252.
14. Саматова Л.А., Киенко Л.А., Воронова О.В., Плюснина Л.Н. Разработка технологии обесфосфоривания питания шеелитовой флотации с целью повышения эффективности переработки шеелитовых руд // Роль горной науки в освоении минерального сырья Дальневосточного федерального округа. Хабаровск: ДВО РАН, Приамур. географ. об-во, 2003. С. 162–167.
15. Саматова Л.А., Киенко Л.А., Воронова О.В., Плюснина Л.Н. Извлечение апатита в одноименный продукт из шеелитовых руд Лермонтовского месторождения // Экономика и проблемы освоения минеральных ресурсов. М.: ГИАБ, 2007. Дальний Восток. Вып. 16. С. 186–195.
16. Саматова Л.А., Киенко Л.А., Воронова О.В. и др. Пути повышения комплексности использования сырья при обогащении вольфрамовых руд Приморья // Горн. журн. 2009. № 8. С. 113–117.
17. Соловьев С.Г. Геолого-генетические особенности вольфрамового месторождения Скрытое в Центральном Сихотэ-Алине (Россия) // Геология руд. месторождений. 1995. Т. 37, № 2. С. 142–158.
18. Степанов Г.Н. Минералогия, петрография и генезис скарново-шеелит-сульфидных месторождений Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 178 с.
19. Шубов Л.Я., Иванков С.И., Щеглова Н.К. Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья. М.: Недра. 1990. Т. 2. 263 с.
20. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5–34.

Рекомендована к печати И.Ю. Рассказовым