

тельной обстановке на глубине приблизительно в 4–5 м. Возможно, здесь располагается геохимический барьер, приуроченный к грунтовым водам, где происходит вторичное сульфидное обогащение.

#### Выводы

Проведенные исследования показали принципиальную возможность обнаружения не выходящих на поверхность «слепых» колчеданных руд с помощью индукционных электроразведочных методов, таких как дипольное электромагнитное профилирование (ДЭМП) и метод техногенного электромагнитного поля (ТЭМП). Ореол слабой сульфидной минерализации, обрамляющий рудное тело и достигающий верхней части разреза, можно обнаружить по поляризационным эффектам, в частности, по аномалиям частотной дисперсии электрического сопротивления. Изучение частотной дисперсии по гармоникам ТЭМП возможно только в профильном варианте, в ближней зоне источника индустриального поля, например, вблизи линий электропередачи.

Исследования поляризуемости геологических объектов с помощью ДЭМП можно проводить как по отдельным профилям, так и в площадном варианте. Съёмку рекомендуется вести на двух частотах, отличающихся приблизительно на порядок, при фиксированном расстоянии между питающим и приемным диполями в 20–40 м.

*Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты №15-2-5-31 и №15-11-5-13. Авторы выражают благодарность сотрудникам Института геофизики УрО РАН — Горшкову В.Ю., Маликову А.В. и Арзамасцеву Е.В., принимавшим участие в полевых работах.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Байдинов, С.В. Аппаратура для высокочастотных индукционных зондирований МЧЗ-8 / С.В. Байдинов, А.И. Человечков // Уральский Геофизический Вестник. — 2011. — № 1. — С. 4–8.

2. Вешев, А.В. Электромагнитное профилирование / А.В. Вешев, В.Г. Ивочкин, Г.Ф. Игнатъев — Л.: Недра, 1971. — 216 с.
3. Давыдов, В.А. Способ преобразования аудиоманнителлурических данных с учетом априорной информации / В.А. Давыдов // Геофизические исследования. — 2016 — Т. 17. — № 4. — С. 57–66.
4. Давыдов, В.А. Измерительная аппаратура ОМАР-2 для электромагнитных методов исследований / В.А. Давыдов // Уральский геофизический вестник. — 2015. — № 1 (25). — С. 37–41.
5. Давыдов, В.А. Аудиоманнителлурическая съёмка в движении / В.А. Давыдов // Геофизика. — 2014а. — № 2. — С. 47–53.
6. Давыдов, В.А. Эквивалентные схемы и основные характеристики различных датчиков электромагнитных сигналов в широкой полосе частот / В.А. Давыдов // Уральский геофизический вестник. — 2014б. — № 1 (23). — С. 46–54.
7. Ермаков, Н.П. Поиски глубокозалегающих месторождений железа, меди и бокситов на Урале с применением комплекса геофизических методов / Н.П. Ермаков, З.Я. Сегаль, И.М. Пильник, В.В. Бояринков, В.К. Бабенков // Строение и развитие земной коры и структур рудных полей Урала по геофизическим данным. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1976. — С. 62–69.
8. Задорожная, В.Ю. Поляризационные свойства осадочных горных пород и руд: физические процессы, математическое моделирование и лабораторные измерения / В.Ю. Задорожная // Матер. пятой всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли — ЭМЗ-2011. В 2-х книгах. Книга 2. — СПб: СПбГУ, 2011. — С. 256–259.
9. Кормильцев, В.В. Электроразведка в поляризующихся средах / В.В. Кормильцев, А.Н. Мезенцев. — Свердловск: УрО АН СССР, 1989. — 128 с.
10. Родионов, П.Ф. Сравнительная характеристика методов скважинной электроразведки (по материалам Чусовского колчеданного месторождения) / П.Ф. Родионов, С.А. Жданов, А.А. Кожевников, И.И. Кононенко / Теория и практика электрометрии. — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1972. — С. 164–176.
11. Светов, Б.С. О связи феноменологического описания вызванной поляризации среды с происходящими в ней физическими процессами. Постановка вопроса / Б.С. Светов, В.В. Агеев, О.А. Агеева, С.Д. Каринский // Геофизика. — 2011. — № 4. — С. 25–29.
12. Титлинов, В.С. О возможности использования полей-гармоник 50-периодного тока промышленных ЛЭП в многочастотной электроразведке / В.С. Титлинов // Теория и практика электромагнитных методов геофизических исследований: Сб. науч. трудов. — Екатеринбург: Наука. Уральское отд-е, 1992. — С. 64–77.

© Давыдов В.А., Байдинов С.В., Астафьев П.Ф., 2017

Давыдов Вадим Анатольевич // davyde@yandex.ru  
Байдинов Сергей Владимирович // badikek@mail.ru  
Астафьев Павел Федорович // pashaek@mail.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.7

Иванова М.В., Броницкая Е.С., Соколов С.В. (ФГБУ «ВИМС»), Газалева Г.И. (ОАО «Уралмеханобр»)

### ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ ТОНКОВКРАПЛЕННЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗЛИЧНОГО ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ

*Показана эффективность применения комплекса современного оборудования как в процессе рудоподготовки, так и при гравитационно-магнитном обогащении тонковкрапленных редкометалльных руд. Установлено влияние содержания тонкозернистых фракций на возмож-*

*ность получения танталового концентрата. Ключевые слова: редкометалльные руды, селективная рудоподготовка, гравитационно-магнитное обогащение, современное оборудование, танталовый концентрат.*

Ivanova M.V., Bronitskaya E.S., Sokolov S.V. (VIMS), Gazaleeva G.I. (Uralmehanoobr)

### OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY OF ENRICHMENT OF RARE-METAL ORES WITH THE APPLICATION OF MODERN EQUIPMENT OF VARIOUS PRINCIPLE OF ACTION

*The efficiency of using a complex of modern equipment in the process of ore preparation and in the gravitational-magnetic enrichment of finely-grained rare-metal ores has been shown. The influence of the content of fine-grained fractions on the*

possibility of obtaining tantalum concentrate has been established. **Keywords:** rare metal ores, selective ore preparation, gravitational-magnetic enrichment, modern equipment, tantalum concentrate.

Россия по большинству редких металлов обладает крупнейшей в мире минерально-сырьевой базой (МСБ), отличительной чертой которой является наличие значительных запасов редких металлов в неразрабатываемых месторождениях Восточной Сибири. Основу МСБ составляют комплексные редкометалльные месторождения, отличающиеся специфическими особенностями; на них приходится основная масса отечественных балансовых запасов *тантала* (70 %) и более половины запасов *ниобия* (54 %) [1, 3].

В рудах редких металлов (Ta, Nb, TR, Be и др.) отмечается наличие многочисленных минеральных фаз, для которых характерен широкий диапазон вкрапленности полезных минералов с преимуществом в них тонкой вкрапленности ценных минералов, непостоянство их вещественного состава и физико-химических свойств, наличие в рудах большого количества тяжелых и магнитных сопутствующих минералов.

Значительно осложняет разделение минералов в доводочных операциях ожелезненность минеральной поверхности, нивелирующая магнитные и электрические свойства полезных и сопутствующих минералов.

Технологические схемы переработки труднообогащаемых редкометалльных руд месторождений России имеют сложный многооперационный характер, что приводит к росту себестоимости получаемых товарных продуктов.

Для редкометалльных руд в стадии первичного обогащения используются преимущественно трехстадиальные гравитационные схемы, которые при наличии тонкой вкрапленности полезных минералов не обеспечивают высокого извлечения металлов (55–65 %) ввиду малой разницы в плотностях извлекаемых и породообразующих минералов и потерями металлов со шламами.

Полезные минералы в рудах чаще всего находятся в агрегативном состоянии с породообразующими минералами или в виде микровключений в них. Дальнейшее доизмельчение не обеспечивает высокого извлечения полезных компонентов из-за плохой извлекаемости тонких частиц гравитационными методами. Для редкометалльных руд также характерно наличие в исходном материале значительного количества тонкозернистой фракции, состоящей из тонких глинистых, иллитоподобных и окисленных охристых железистых минералов и пленок, нивелирующих контрастные свойства основных ценных минералов и предопределяющих трудную обогатимость сырья. При доводке черновых редкометалльных концентратов потери металлов достигают 15–20 %, что объясняется близостью магнитных, электрических свойств полезных и сопутствующих минералов из-за ожелезненности их минеральной поверхности, что затрудняет их селекцию [2, 3, 5].

Этими факторами определяется необходимость использования комплекса современных методов рудоподготовки, гравитационного и магнитного обогащения при разработке схем переработки тонковкрапленных комплексных редкометалльных пегматитовых руд.

Объектом исследований являлась тонковкрапленная комплексная редкометалльная пегматитовая руда, содержащая, масс. %: Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0,018; Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0,031; SiO<sub>2</sub> — 73,0; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 16,1; Na<sub>2</sub>O — 7,51; K<sub>2</sub>O — 2,17; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> — 0,14; S<sub>общ</sub> < 0,1 %; TiO<sub>2</sub> — 0,019; Rb — 0,17; Sn — 0,0036; Li — 0,0021; Th — 0,0003; U — 0,0006.

По содержанию пентоксида тантала (0,031 масс. %) изучаемая руда относится к богатой. Повышенные концентрации установлены для рублидия (0,17 масс. %). Выявленные содержания тория (3 г/т) и урана (6 г/т) свидетельствуют о низкой радиоактивности руды. Количество P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,14 %) и S<sub>общ</sub> (< 0,1 %) говорят о том, что апатит и сульфиды присутствуют на уровне акцессорных минералов.

Главными породообразующими минералами являются альбит, микроклин, кварц, мусковит. По минеральному составу рудные пегматиты относятся к кварц-микроклин-альбитовому типу.

В руде проявлена разнообразная редкометалльная минерализация. Главный полезный элемент Ta вместе с Nb являются видообразующими в установленных ниобо-танталатах — микролите, колумбит-танталите, иксиолите, воджините, анализы которых показали высокие и очень высокие содержания Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (табл. 1).

Другие редкие элементы концентрируются в лепидолите и Li-мусковите (Li), микроклине и Rb-

**Таблица 1**  
Среднее содержание тантала и ниобия в рудных минералах (масс. %)

Минерал	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Микролит*	68,01	11,30
Микролит**	64,90	7,06
Иксиолит	65,28	5,66
Воджинит	70,26	4,96
Танталит*	66,44	16,08
Ниоботанталит**	51,18	27,95
Колумбит	36,43	45,81

\* — неизмененный, \*\* — измененный

**Таблица 2**  
Характеристика раскрытия рудных минералов

Класс крупности, мм								
-0,5+0,315			-0,315+0,1			-0,1+0,074		
A	Б	В	A	Б	В	A	Б	В
21%	25%	54%	35%	14%	51%	97%	3%	

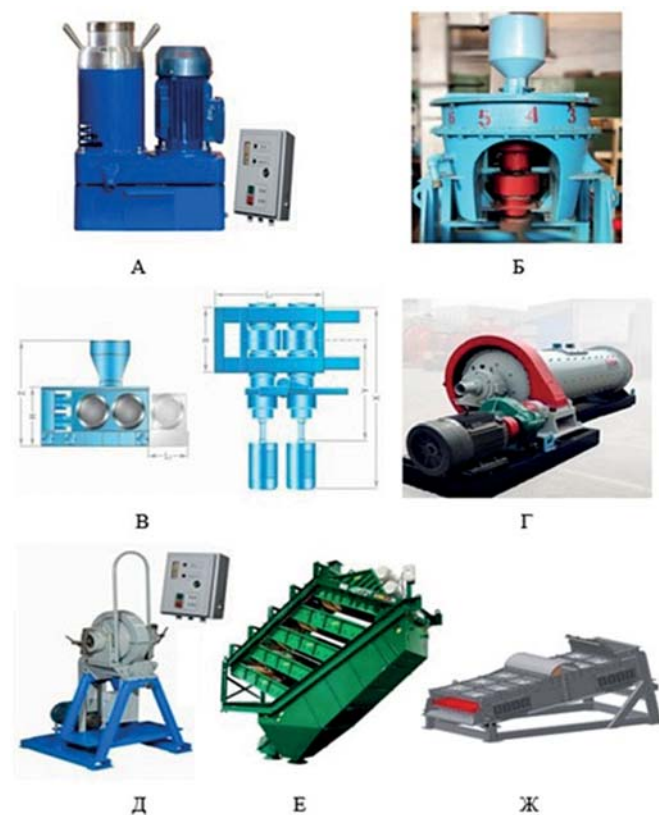
Примечание: А — свободные зерна (возможны незначительные примазки нерудных минералов, преимущественно альбита); Б — бедные и богатые сростки ниобо-танталатов с нерудными минералами: от 10–15 (преобладают) до 60–70 об. %; В — точечные и мелкие включения редкометалльных минералов (главным образом в альбите, изредка в кварце).

мусковите (Rb). Перечисленные минералы (за исключением микролина и слюд), а также апатит, касситерит и спессартин относятся к аксессуарным. Все они обладают преимущественно микрометровыми размерами и визуально в руде фиксируются крайне редко.

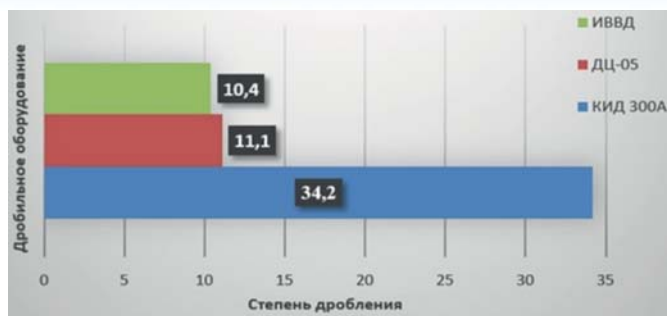
Танталовая минерализация в рудных пегматитах присутствует преимущественно в виде рассеянной вкрапленности кристаллов и зерен микрометрового уровня. Изучение раскрытия полезных минералов посредством оптико-минералогического метода показало, что высокое содержание их свободных зерен достигается только в классе крупности  $-0,1$  мм, что требует тонкого измельчения рудной массы при проведении технологических испытаний (табл. 2).

Поскольку все упомянутые ниобо-танталаты характеризуются повышенной хрупкостью, то при измельчении рудной массы они легко разрушаются, что приводит к обогащению свободными фрагментами и богатыми сростками тонких классов. В связи с этим значительное влияние на результаты обогащения и технологическую схему оказывает выбор оптимального процесса рудоподготовки [4].

Исследования по рудоподготовке проводились с учетом разработанной и апробированной методики (методических рекомендаций) № 105 «Специальные способы рудоподготовки при обогащении тонко-



**Рис. 1. Дробильно-измельчительное оборудование:** А — конусная инерционная дробилка — КИД-300А; Б — центробежно-ударная дробилка — ДЦ-05; В — лабораторная установка ИВВД модели LABWAL Thyssen; Г — стержневая мельница МСЦ 36×45; Д — мельница шаровая МШЛ-7; Е — грохот Derrik; Ж — грохот Kroosh



**Рис. 2. Выбор дробильного оборудования в зависимости от степени дробления**

вкрапленных труднообогатимых руд, содержащих редкие металлы» (Г.И. Газалева, Е.Н. Левченко, Е.В. Братыгин) на следующем современном оборудовании (рис. 1):

- центробежно-ударная дробилка — ДЦ-05 (рис. 1Б);
- конусная инерционная дробилка — КИД 300А (рис. 1А);
- валковая дробилка высокого давления — ИВВД — LABWAL (рис. 1В);
- центробежная мельница — ЦОМ;
- стержневая мельница — МСЦ 36 × 45 (рис. 1Г);
- шаровая мельница МШЛ-7 (рис. 1Д);
- грохот Derrik (рис. 1Е);
- грохот Kroosh (рис. 1Ж).

Поиск эффективной технологии рудоподготовки осуществлялся определением оптимальной крупности дробления и измельчения, выбором эффективного механизма селективного разрушения породы, обеспечивающего максимальное раскрытие минералов при низкой степени ошламования [2, 4].

Для выбора оптимального способа дробления определялся гранулометрический состав конечного продукта мелкого дробления крупностью  $-2$  мм, а также степень раскрытия минералов редких металлов в классах ситовых анализов дробленной руды (содержание свободных зерен и сростков). По данным параметрам рассчитывались показатели степени дробления, критерии селективности и степени ошламования.

*Степень дробления* — расчет производился на основании гранулометрических характеристик исходного и дробленного продуктов (рис. 2).

*Оценка ошламования* — по результатам гранулометрической характеристики проб, дробленных до крупности  $-2$  мм, определялся выход шламовой фракции для различных способов дробления. Критерием оптимальности для шламовой фракции являлся выход фракции менее 50 мкм и 5 мкм (рис. 3).

*Оценка селективности* определялась по результатам минералогического анализа степени раскрытия минералов тантала, в частности танталита, как отношение количества свободных зерен полезного минерала в заданном классе крупности дробленного материала к количеству свободных зерен в заданном классе крупности исходного продукта [2].

Фактически уже в процессе дробления происходит частичное раскрытие ценных минералов. В связи с этим целью процесса измельчения является получение наименьшего ошламования полезных минералов. Проведено сравнение процесса измельчения на центробежной мельнице (ЦОМ) с традиционным методом измельчения в стержневой мельнице (рис. 4). Также сравнивалась эффективность работы в замкнутом цикле измельчения грохотов Kroosh и Derrik.

Конечные продукты измельчения оценивались по гранулометрическим характеристикам [4]. Также сравнивались количество и грансостав шламов — частиц крупностью менее 0,05 мм и не менее 0,005 мм.

Результаты исследований показали, что при применении стержневой мельницы выход готового для обогащения класса крупностью  $-0,1$  мм составляет 91,56 %. При использовании грохота Kroosh, работающего в замкнутом цикле с мельницей, циркуляция составляет 100 % и при этом будет получаться готовый продукт крупностью менее 0,1 мм, соответствующий степени полного раскрытия танталовых минералов.

На основании проведенных экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

Сравнение гранулометрических характеристик руды, полученных при дроблении с использованием

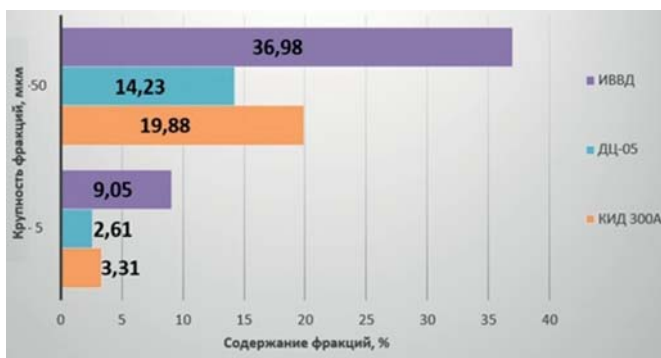


Рис. 3. Выбор дробильного оборудования в зависимости от степени ошламования

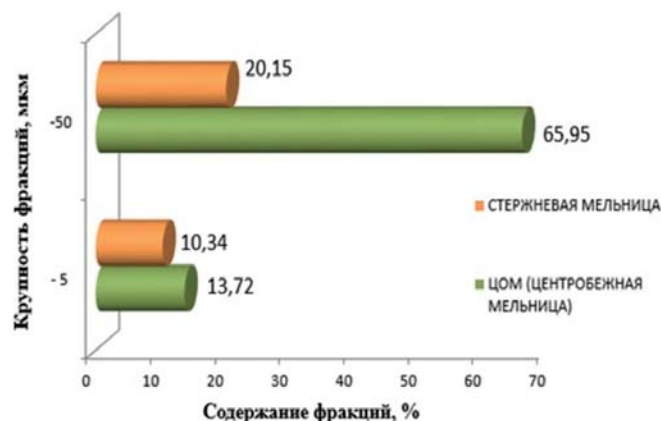


Рис. 4. Определение степени ошламования редкометалльных минералов по схемам измельчения на ЦОМ и стержневой мельнице

дробилок ДЦ-05, КИД 300А и ИВВД — LABWAL, показывает значительное преимущество дробилки КИД-300А перед дробилкой ДЦ-05 и ИВВД по степени дробления. Дробилка КИД-300А обеспечивает самое низкое ошламование как по содержанию фракции менее 50 мкм, так и 5 мкм. Таким образом, наилучшим аппаратом для дробления танталовых руд, с точки зрения степени дробления и ошламования, является дробилка КИД.

Анализ показателя эффективности грохочения, гранулометрических характеристик подрешетных продуктов грохота и количества шламов показывает преимущество грохота Kroosh по отношению к грохоту Derrik. Эффективность грохочения для грохота Kroosh составляет 92 %, для грохота Derrik — 87 %.

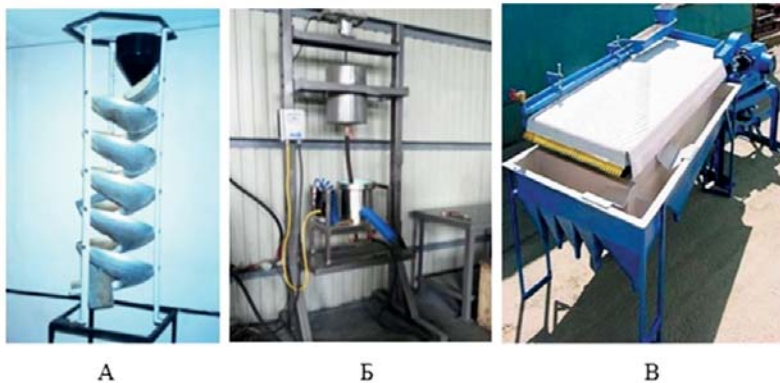
Для измельчения исследуемых танталовых руд рекомендуется использование стержневой мельницы. Степень ошламования в ней по фракциям крупности менее 50 и 5 мкм составляет соответственно — 20,15 и 10,34 %, что в 3,3 и 1,3 раз ниже, чем в центробежной мельнице ЦОМ.

Таким образом, выбор общей технологической схемы рудоподготовки с применением специальных методов для танталовых руд основан на использовании оборудования, обеспечивающего наибольшую степень дробления (дробилка КИД), лучшую эффективность при тонком грохочении (грохот Kroosh) и наименьшую степень ошламования при измельчении (стержневая мельница).

Изучение магнитных и гравитационных свойств редкометалльной руды пегматитового типа, влияния раскрываемости танталовых минералов при рудоподготовке позволило установить, что наиболее эффективным процессом первичного обогащения руды является гравитационный метод, обеспечивающий извлекаемость в черновой концентрат всего комплекса присутствующих в руде ценных минералов. Такие технологические свойства ценных минералов, как: повышенная плотность, сравнительно низкая магнитная восприимчивость, а также полидисперсный характер выделений (размер отдельных кристаллов и агрегатов в руде различаются на два-три порядка) предопределяют применение стадийных гравитационных схем обогащения с начальной крупностью, превышающей размер зерен ценных минералов в два-три раза, и конечной, определяемой как гранулометрической характеристикой этих минералов, так и техническими возможностями современного обогатительного оборудования.

При проведении исследований по гравитационному обогащению использовались следующие обогатительные аппараты с различным принципом действия (рис. 5): винтовой сепаратор — FM 1 (рис. 2А); центробежный концентратор Falcon L-40 (рис. 2Б); концентрационный стол опорного типа «Wilfley» (рис. 2В).

Проведение гравитационно-магнитных исследований регламентировалось разработанной и апробиро-



**Рис. 5. Гравитационное оборудование:** А — винтовой сепаратор — FM 1; Б — центробежный концентратор Falcon L-40; В — концентраторный стол опорного типа «Wilfley»

ванной методикой (методическими рекомендациями) № 107 «Гравитационное и магнитное обогащение комплексных редкометалльно-редкоземельных руд» (Е.С. Броницкая, Е.Н. Левченко).

Первичное гравитационное обогащение руды крупностью  $-0,5+0$  мм было проведено с использованием винтового сепаратора FM-1, руды крупностью  $-0,315+0$  мм и  $-0,1+0$  мм — на концентраторном столе опорного типа «Wilfley», руды крупностью  $-0,1+0$  мм — на центробежном концентраторе Falcon L-40.

Результаты винтовой сепарации руды крупностью  $-0,5+0$  мм показали существенное влияние на качество гравитационных концентраторов и извлекаемость в них пентаоксида тантала и ниобия крупности исходного питания. С помощью винтовой сепарации выделено 54,17 % материала в хвосты, потери  $Ta_2O_5$  при этом составили 71,83 %, что исключает операцию винтовой сепарации из технологической схемы обогащения.

Гравитационное обогащение на центробежном концентраторе Falcon L-40 по методике Ultra Fine руды крупностью  $-0,1+0$  мм позволили выделить суммарный концентрат с выходом 0,83 % и содержанием  $Ta_2O_5$  — 1,12 %, потери  $Ta_2O_5$  составляют 69,78 %. Однако большие потери ценного компонента в хвостах и невысокий выход концентрата говорят об неэффективности применения концентратора Falcon и включение данной операции в технологическую схему нецелесообразно.

Преимуществами концентраторного стола опорного типа «Wilfley» является удаленная от промпродукта и тем более от хвостов разгрузка концентрата, что обеспечивает сразу получение коллективного продукта и сокращает количество перечистных операций, а также обеспечение высокой извлекаемости тонких частиц и получение гравитационных высококачественных танталовых концентраторов за счет специфики приводного механизма стола и качественной характеристики конструкции и покрытия деки стола с коэффициентом трения, обеспечивающих эффективное извлечение как зернистых, так и шламовых частиц.

При обогащении на концентраторном столе «Wilfley» руды крупностью  $-0,1+0$  мм получен концентрат, содержащий 10,25 %  $Ta_2O_5$  и 1,22 %  $Nb_2O_5$  при извлечении 52,42 и 10,48 % и выходе — 0,13 % от руды. Основные потери связаны со шламами, выход которых составил 66,01 % от руды при потерях  $Ta_2O_5$  — 39,34 % и  $Nb_2O_5$  — 85,49 %.

При гравитационном обогащении на концентраторном столе «Wilfley» руды крупностью  $-0,315+0$  мм получен черновой концентрат, содержащий 8,01 %  $Ta_2O_5$  и 3,65 %  $Nb_2O_5$  при извлечении 63,53 и 49,42 % и выходе — 0,23 %. Полученный черновой концентрат доизмельчался до крупности  $-0,16+0$  мм и направлялся на доводку методом сухой магнитной сепарации на электромагнитном индукционно-роликовом сепараторе 138-СЭМ при напряженности магнитного поля 0,5 Тл. В результате доводки был получен танталовый концентрат, содержащий 30,2 %  $Ta_2O_5$  и 3,58 %  $Nb_2O_5$  при извлечении 60,4 и 12,21 % соответственно.

Результатом проведенных исследований по глубокому обогащению тонковкрапленных комплексных редкометалльных пегматитовых руд стала разработка гравитационно-магнитной схемы обогащения, включающая:

специальную рудоподготовку с использованием современной аппаратуры: конусной инерционной дробилки КИД, многочастотного вибрационного грохота Kroosh и стержневой мельницы;

гравитационно-магнитное обогащение измельченной руды с использованием современных концентраторных столов опорного типа «Wilfley» с доводкой черного концентрата магнитной сепарацией при напряженности магнитного поля 0,5 Тл.

По разработанной и экспериментально проверенной схеме был получен танталовый концентрат марки ТАК-2 — 30,2 %  $Ta_2O_5$  (ТУ-48-4-233-72) при извлечении 60,4 % от руды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский, Л.З. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений / Л.З. Быховский, С.Д. Потанин // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — М.: ФГУП «ВИМС», 2009. — № 28. — 156 с.
2. Газалеева, Г.И. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение / Г.И. Газалеева, Е.Ф. Цыпин, С.А. Червяков. — Екатеринбург: ООО «УЦАО», ОАО «УРАЛМЕХАНОБР», 2014. — 914 с.
3. Кременецкий, А.А. Комплексные редкометалльные месторождения России и основные направления повышения их инвестиционной привлекательности / А.А. Кременецкий, Е.А. Калиш // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9 — С. 3–8.
4. Маляров, П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки / П.В. Маляров. — Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. — 311 с.
5. Чистов, Л.Б. Современное состояние технологии обогащения руд редких металлов России / Л.Б. Чистов, В.Е. Охрименко // Обогащение руд. — 2006. — № 1 — С. 7–10.

© Коллектив авторов, 2017

Иванова Маргарита Валерьевна // margo\_898989@mail.ru  
Броницкая Елена Сергеевна // vims@df.ru  
Соколов Станислав Владимирович // vims-sokol@mail.ru  
Газалеева Галина Ивановна // gazaleeva\_gi@umbr.ru