

3. Логвинов, А.П. Оптический флюорит в Зеравшанском хребте / А.П. Логвинов // Геология и полезные ископаемые Зеравшано-Гиссарской горной системы (Таджикистан). — М.–Л.: Госгеолиздат, 1940. — С. 155–189.

4. Логвинов, А.П. Оптический барит в Зеравшанском хребте (Таджикская ССР) / А.П. Логвинов, И.Г. Магакьян, С.З. Шифрин // Минеральное сырье. — 1938. — № 2. — С. 20–26.

5. Пейве, А.В. Зеравшанская провинция оптических минералов / А.В. Пейве, А.П. Логвинов, Я.А. Левен // Геология и полезные ископаемые Средней Азии: Итоги Ср.-Азиат. экспедиции за 1937 г. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1940. — С. 111–136.

6. Проблемы Таджикистана. Т. 1: Тр. первой конференции по изучению производительных сил Таджикской ССР. — Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1933. — 305 с.

7. Серых, Н.М. Из истории развития отраслевого направления работ на пьезооптическое, кварцевое и камнесамоцветное сырье / Н.М. Серых, А.А. Фролов // Разведка и охрана недр. — 2007. — № 10. — С. 2–9.

8. Соболевский, В.И. Замечательные минералы: Из записной книжки минералога / В.И. Соболевский. — М.–Л.: Госгеолиздат, 1940. — 224 с.

9. Соболевский, В.И. Флюорит и барит с озера Куликолон / В.И. Соболевский // Таджикско-Памирская экспедиция 1934 г. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1935. — С. 207–220.

10. Соболевский, В.И. Куликолонское месторождение и его оптический флюорит: с очерком месторождений флюорита за границей и в СССР: Тр. Экспедиции 1934 г. АН СССР. Таджикско-Памирская экспедиция. — Вып. 60 / В.И. Соболевский, А.В. Сарычева, Смоленский Е.Н. — М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1936. — 224 с.

11. Соболевский, В.И. Куликолонское месторождение оптического флюорита / В.И. Соболевский, С.З. Шифрин, А.В. Сарычева // Таджикско-Памирская экспедиция 1933 г. — Л.: Госхимтехиздат, ОНТИ, Ленингр. отд., 1934. — С. 162–189.

12. Федоровский, Н.М. По горам и пустыням Средней Азии / Н.М. Федоровский. — М.: ОНТИ, 1937. — 184 с.

13. Юшкин, Н.П. Оптический флюорит / Отв. ред. В.П. Петров / Н.П. Юшкин, Н.В. Волкова, Г.А. Маркова. — М.: Наука, 1983. — 136 с.

© Печенкин И.Г., 2019

Печенкин Игорь Гертудович //pechenkin@vims-geo.ru

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 553.461(470.5):549.08+622.7

Горбатова Е.А.¹, Пирогов Б.И.¹, Раков Л.Т.²,
Киселев А.А.¹, Иоспа А.В.¹, Чепрасов И.В.¹
(1 — ФГБУ «ВИМС», 2 — ИГЕМ РАН)

ОЦЕНКА ОБОГАТИМОСТИ ХРОМОВЫХ РУД АККАРГИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕТОДАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Целенаправленные опережающие минералогические исследования вкрапленной хромовой руды Аккаргинского месторождения позволили установить ее текстурно-структурные особенности, минеральный состав, видовую разновидность хромшпинелида, а также физические свойства минеральных сростков методами технологической минералогии. Такой подход разрешил определить поведение минеральных сростков и индивидов в технологических процессах и рекомендовать в качестве основного метода обогащения руд гравитационный. Ключевые слова: хромовые руды, технологические свойства, минералого-аналитические методы, обогатимость, технологическая минералогия.

Gorbatova E.A.¹, Pirogov B.I.¹, Rakov L.T.², Kiselev A.A.¹, Iospa A.V.¹, Cheprasov I.V.¹ (1 — VIMS, 2 — IGEM)

APPRAISAL OF CHROME ORES BENEFICIATION OF AKKARGINSKIY DEPOSIT BY TECHNOLOGICAL MINERALOGY METHODS

Focused leading mineralogical research of disseminated chrome ore Akkarginskiy deposit allowed to establish its textural and structural features, mineral composition, species variety of spinel, and physical properties of mineral aggregates by technological mineralogy methods. This approach

allowed to determine the behavior of mineral aggregates and individuals in technological processes and recommend gravity method as the main method of ore beneficiation. Keywords: chrome ore, technological properties, mineralogical and analytical methods, preparation, technological mineralogy.

Актуальность

Для рационального использования хромовых руд и создания эффективной технологии их обогащения целесообразно применение системы управления качеством добываемого сырья, основным элементом которой является определение возможности предобогащения (радиометрическая сепарация) и (или) разделения руды в тяжелых суспензиях. Выбор дальнейших способов переработки руд традиционными методами глубокого обогащения (гравитации, магнитной сепарации, флотации) проводится с учетом технологических возможностей и экономической эффективности [3].

Возможность применения методов предобогащения и традиционных методов глубокого обогащения хромовых руд определяется их вещественным составом и степенью контрастности, проявляющейся на различных минералогических уровнях: минеральные агрегаты → типы сростаний → индивиды [5]. На уровне минеральных агрегатов контрастностью является степень неравномерности распределения рудного минерала в силикатной массе, установленная по элементарным объемам руды. На уровне типов сростаний контрастность проявляется в различиях физических свойств, контактирующих рудных и нерудных минералов. На уровне индивида контрастность выражается в изменчивости его морфологии, гранулометрии, элементного и фазового составов.

Таблица 1
Последовательность изучения хромовых руд технологической пробы

Этапы	Подготовка проб к исследованию	Виды минералогических исследований	Задачи
Информационно-аналитический	—	Ретроспективный анализ	Анализ исследований российских и зарубежных ученых в области технологической минералогии хромовых руд
Горно-геологический	—	Анализ исходной горно-геологической информации	Адаптация схем изучения минерального сырья к исследованию хромовых руд
Анализ исходной хромовой руды	Отбор штуфов, изготовление прозрачных и полированных шлифов, подготовка аналитической навески пробы и продукта классификации класса –0,044+0 мм	Исследование текстурно-структурных особенностей хромовой руды, включая гранулометрический анализ рудных минералов, методами оптической микроскопии (оптико-петрографическим, минераграфическим)	Обоснование схемы рудоподготовки, аргументация тонины помола руды
		Определение количественного минерального состава комплексом методов (методами оптической микроскопии и рентгенографическим количественным фазовым анализом)	Оценка комплексного использования хромовых руд
		Анализ элементного состава рудных и силикатных минералов рентгеноспектральным микроанализом	Определение форм нахождения хрома, установление разновидностей рудного минерала. Составление поминерального баланса хрома, анализ возможных потерь
Анализ продуктов классификации	Продукты классификации пробы: –10+6; –6+2; –2+1; –1+0,5; –0,5+0,2; –0,2+0,1; –0,1+0,071; –0,071+0,044 мм	Оценка степени раскрытия зерен рудных минералов и распределения типов рудных сростков по классам крупности оптико-минералогическим методом	Обоснование принципиальной схемы рудоподготовки, вероятных потерь в продуктах обогащения
		Изучение плотностных и магнитных свойств минеральных сростков специальными методами исследования	Оценка эффективности применения гравитационных и магнитных методов обогащения

Целью работы является прогнозная оценка обогатимости вкрапленной хромитовой руды Аккаргинского месторождения методами технологической минералогии.

Методы исследования

Лабораторные испытания технологической пробы хромовых руд Аккаргинского месторождения сопровождаются целенаправленными опережающими минералогическими исследованиями, сконцентрированными на изучение структурно-текстурных особенностей руд, их химического и минерального составов, а также свойств отдельных минеральных сростков, определяющих их поведение в технологических процессах [2].

Анализ методических подходов к изучению хромовых руд, сопровождающих технологические испытания малообъемных проб, позволил выделить основные этапы и последовательность минералогических исследований, включающих следующие виды работ (табл. 1) [9]:

- макроскопическое изучение руды с выявлением текстурных и макроструктурных особенностей;
- микроскопическое изучение прозрачных и полированных шлифов с определением общих особенностей минерального состава руды, ее микроструктуры, морфологии и гранулярного состава минералов, слагающих руду;
- микроскопическое изучение продуктов классификации, анализ характера распределения минеральных сростков в продуктах классификации;

- изучение физических свойств минеральных сростков;
- проведение фазового анализа руды;
- расчет поминерального баланса.

При изучении хромовых руд использовался комплекс минералого-аналитических методов, включающий оптическую микроскопию (оптико-петрографический и минераграфический методы), количественный рентгенографический анализ и рентгеноспектральный микроанализ, позволяющий получить полную информацию о минеральном составе и структурно-текстурных особенностях руд. Минералогические работы регламентированы методической документацией, утвержденной Научным советом по методам минералогических исследований.

Объект исследования

Аккаргинское месторождение локализуется в одноименном гипербазитовом массиве, расположенном в восточном крыле Буруктальского синклинория Восточно-Уральского прогиба. В пределах Оренбургской области массив вытянут в меридиональном направлении вдоль Аккаргинского глубинного разлома на 40 км при средней ширине 3 км. Площадь массива 150 км² [6–8].

Аккаргинский массив сложен перидотитовыми и дунитовыми серпентинитами часто перемежающимися друг с другом и связанными между собой постепенными переходами. Перидотитовые серпентиниты гарцбургитового типа являются основным типом горных

пород массива. Дунитовые серпентиниты представляют собой рудовмещающие породы, залегающие в виде небольших жилообразных тел среди типичных перидотитовых серпентинитов. По простиранию дунитовые серпентиниты прослеживаются на расстоянии от 1 до 10–20 м и более; мощность обычно незначительная 0,3–0,5 м.

Серпентиниты подверглись процессам метаморфизма, что привело к перекристаллизации дунитовых и главным образом перидотитовых серпентинитов. Процессы изменения пород носят локальный характер. Изменения выражены обычно настолько сильно, что первоначальный состав породы невозможно идентифицировать. Участками серпентиниты сильно карбонатизированы и оталькованы, к крайним продуктам метаморфических изменений ультраосновных пород относятся листвениты и тальково-карбонатные породы.

На периферии массива, в его западной части, широко развиты жильные породы — плагиоклазиты (альбититы), диориты, лампрофиры, пироксениты, хлоритовые, хлорито-гранатовые, везувиано-гранатовые, пироксено-гранатовые породы, альбитофиры, кварцевые альбитофиры, плагиоаплиты. В восточной части участка жильные породы находятся в подчиненном количестве.

Основные хромитовые проявления сконцентрированы в Главной рудной зоне массива. Она имеет меридиональное простирание и крутое (50–60°) западное падение. Углы падения полос дунитовых и перидотитовых серпентинитов в рудной зоне не одинаковы: более крутые в южной и северной частях, более пологие в центральной части.

Рудные тела Аккаргинского месторождения имеют жилообразную, линзовидную, иногда серповидную и изометрическую (штокообразную) формы с раздувами и пережимками. Размеры тел варьируют в широких пределах: по простиранию от 2 до 120 м, по падению от 3 до 60 м и более, мощностью от 2 до 15,5 м.

На месторождении выделяются вкрапленные и массивные руды в соотношении 1,5:1. Вкрапленные руды ассоциируют с серпентинизированными дунитами.

Результаты исследования исходной руды

Хромовые руды малой технологической пробы представляют собой метаморфические горные породы — дунито-

вые серпентиниты с рудной минерализацией, сложенные хромшпинелидами и минералами группы серпентина, подвергшиеся более поздним процессам хлоритизации, оталькования и карбонатизации.

Текстура хромовых руд вкрапленная. По содержанию хромшпинелидов преобладают руды средне- (50–70 %) и редковкрапленного (30–50 %) сложения, в подчиненном значении присутствуют убоговкрапленные с количеством хромшпинелидов не превышаю-

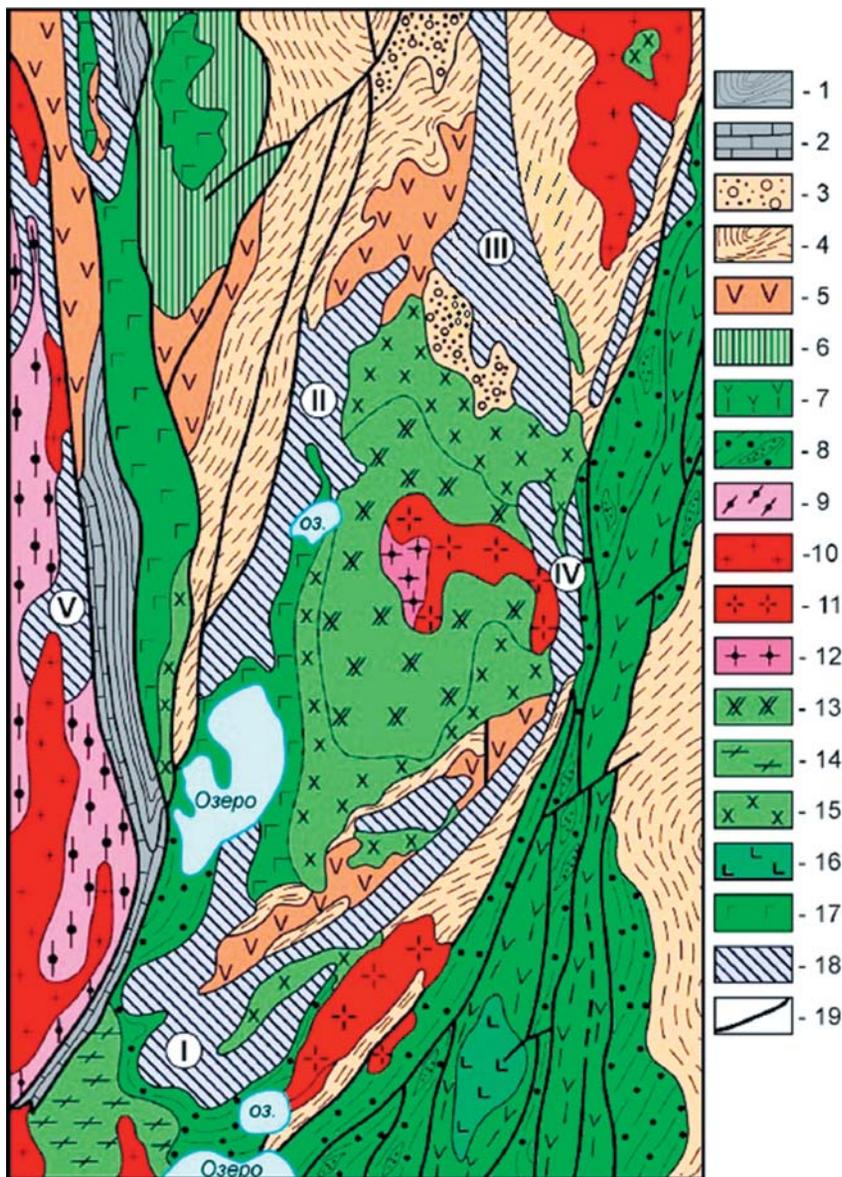


Рис. 1. Геологическое строение Аккаргинско-Буруктальского района по А.С. Варлакову (1978) [8]: 1 — углеродистые сланцы нижнего карбона; 2 — мраморы нижнего карбона; 3 — песчаники и конгломераты верхнего девона; 4 — глинистые сланцы и песчаники верхнего девона; 5 — андезитовые, андезит-дацитовые порфиры и лавобрекчии среднего девона; 6 — отложения ордовика и нижнего силура нерасчлененные; 7 — зеленые сланцы ордовика и нижнего силура; 8 — кристаллические сланцы и гнейсы ордовика и нижнего силура с линзами кварцитов; 9 — докембрийские гнейсы и амфиболиты; 10 — граниты; 11 — плагиограниты; 12 — кварцевые монзониты; 13 — кварцевые диориты; 14 — гранодиориты; 15 — диориты, диоритовые порфиры, габбро-диориты; 16 — габбро-диабазы; 17 — габбро-диориты; 18 — ультрамафитовые массивы (I — Буруктальский, II — Карашакольский, III — Восточно- и Средне-Аккаргинский, IV — Коскольский, V — Карасуйский); 19 — разрывные тектонические нарушения. Рамкой выделено Главное рудное поле Аккаргинского массива

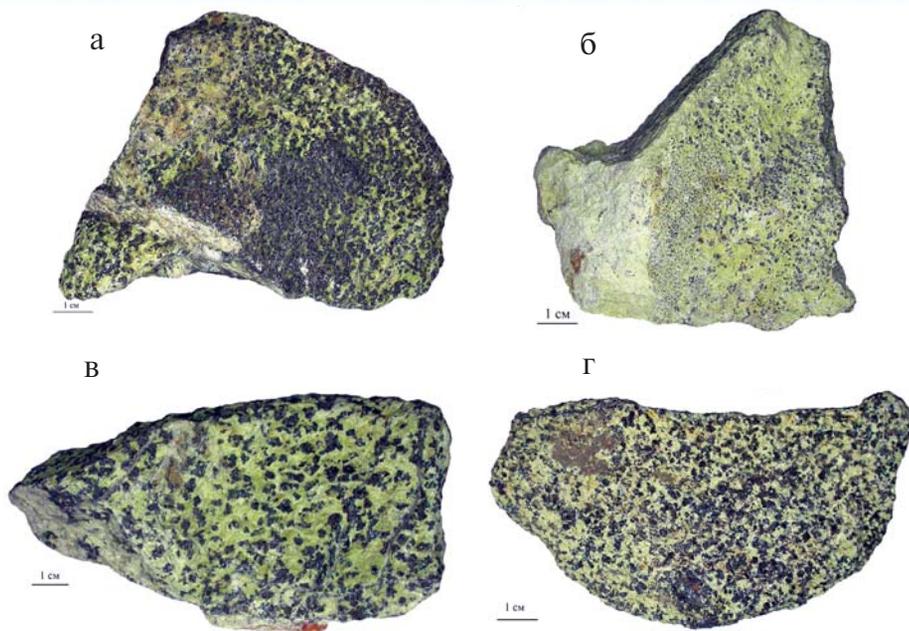


Рис. 2. Текстурно-структурные особенности хромовой руды: а — пятнистая средне-вкрапленная руда; б — пятнистая убоговкрапленная руда; в, г — рябчиковая средне-вкрапленная руда

щим 30 % [3]. По характеру пространственного расположения рудных минеральных агрегатов выделяются пятнистые и рябчиковые текстуры с доминированием последней (рис. 2).

Для пятнистых руд присуще сгущение вкрапленников с образованием рудных обособлений в виде пятен массивного сложения. Форма обособлений неправильная, среднее соотношение длины к ширине составляет 3:1. Границы между участками разной текстуры не резкие, наблюдается постепенный переход от вкрапленных до массивных разновидностей (рис. 2а, б). Рябчиковые руды характеризуются равномерным распределением минеральных агрегатов хромшпинелидов в силикатной массе (рис. 2 в, г), что подчеркивает отсутствие контрастности такой руды и неэффективность применения методов преобогачения — радиометрической сепарации.

Макростроение хромовых руд равномернозернистое, по размеру вкрапленников средне- и мелкозернистое. Для обособлений массивных руд (агрегатов) характерна среднезернистая структура хромшпинелидов с интерстиционными выделениями силикатов.

В рудной части прослеживаются следующие микроструктуры: гипидиоморфнозернистая с

преобладанием изометричных полигональных зерен; структура дробления, обусловленная проявлением трещиноватости и наличием остроугольных форм обломков (рис. 3а); структура коррозии, проявляющаяся в развитии кайм замещения, сложенных более железистой разновидностью хромшпинелидов (рис. 3б). Для силикатной части руды типично решетчато-петельчатое строение, отражающее развитие тонких пересекающихся друг с другом полос хризотила с образованием решетки или петель с отверстиями угловатой или неправильной форм, выполненными лизардитом и клинохлором (рис. 4). По морфологии выделений нерудные минералы в большинстве случаев характеризуются волокнистым, пластинчатым и чешуйчатым строением.

Установлено, что хромовые руды на 48 % состоят из серпентина, 41 % — хромшпинелидов, 11 % — клинохлора, карбонатов, талька и кварца.

Главными нерудными минералами являются *лизардит* и *хризотил* — минералы группы серпентина, развивающиеся по первичным фемическим минералам магматического происхождения, реликты кото-

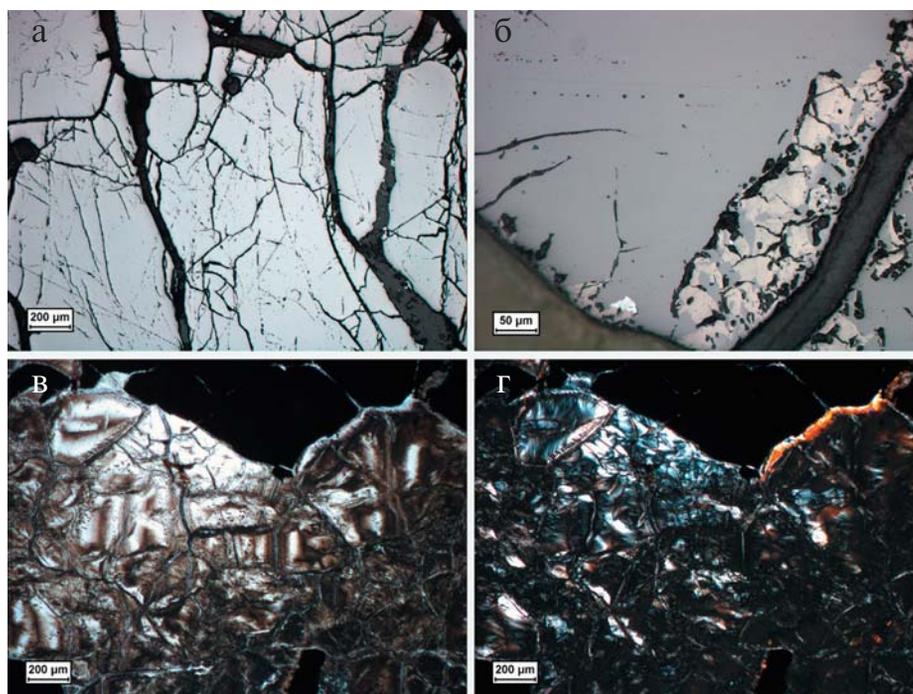


Рис. 3. Строение руды: структура дробления (а) и замещения (б) рудной части; решетчато-петельчатое строение силикатной части руды. Отраженный свет, николи параллельны (а, б); проходящий свет, николи скрещены (г)

рых в породе не отмечены. В результате замещения образуются решетчато-петельчатые структуры, где лизардит выполняет отверстия решеток и петель, а хризотил слагает пересекающиеся полосы или жилки. В рудах лизардит встречается в агрегатах разной степени раскristализации от скрытокристаллических до мелкозернистых (рис. 4). Морфология выделения хризотила — волокнистая, размер волокон достигает 0,15 мм.

Клинохлор, карбонаты и тальк относятся к более поздним минералам, образовавшимся в процессах хлоритизации, карбонатизации и оталькования хромовых руд.

Клинохлор во вкрапленных рудах присутствует в виде трех морфологических разновидностей: 1) индивидуализированных крупных чешуек, выполняющих полости трещин, размером до 0,35 мм по удлинению; 2) сферолитовых агрегатов кварц-клинохлор-кальцитовых натечных образований; 3) мелкозернистых чешуйчатых выделений, рассеянных в массе раскristализованного лизардита и выполняющих трещины в рудных агрегатах.

Карбонаты большей частью ассоциируют с клинохлором. К основным морфологическим разновидностям относятся мелкозернистые агрегаты, выполняющие полости трещин мощностью до 1,4 мм, и натечные образования. Размер зерен карбонатов достигает 0,2 мм. *Тальк* развивается по трещинам в лизардите и

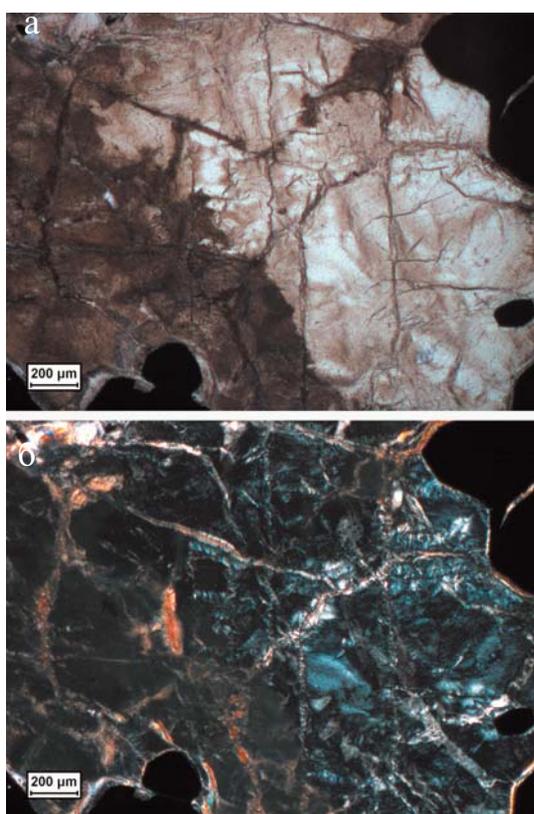


Рис. 4. Нераскristализованный (а — коричневое, б — черное) и раскristализованный (а — белое, б — голубовато-серое) лизардит. Проходящий свет, параллельные (а) и скрещенные (б) николи

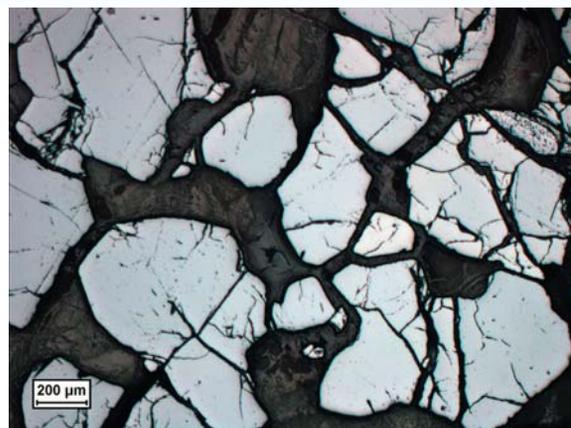


Рис. 5. Зерна хромшпинелидов, разбитые тонкой и грубой трещиноватостью. Отраженный свет, николи параллельны

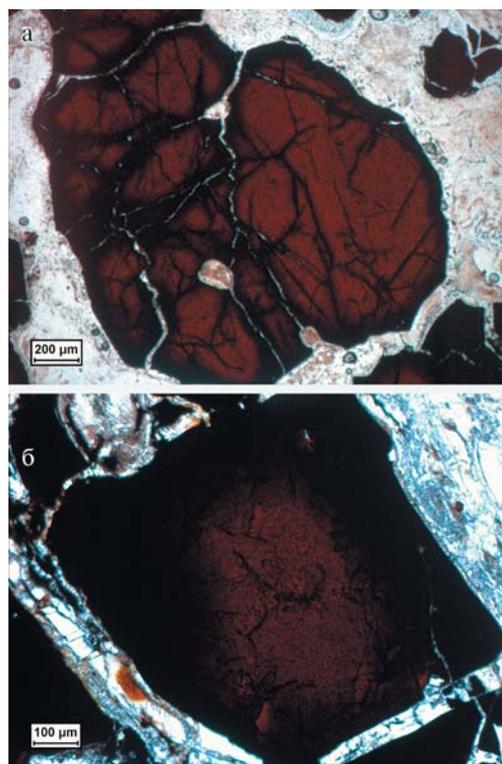


Рис. 6. Оптическая неоднородность зерен хромшпинелидов. Проходящий свет, николи параллельны

образует каймы вокруг зерен хромшпинелидов. Морфология выделения — чешуйчатая, размер чешуек не превышает 0,25 мм. *Кварц* встречается в подчиненном количестве, наблюдается в кварц-клинохлор-кальцитовых натечных образованиях и ассоциирует с хризотилевыми выделениями.

Хромшпинелиды являются основными рудными минералами, содержание рудных зерен (по объему) в шлифах колеблется от 15 до 75 %.

Зерна чаще изометричные, полигональные с угловатыми или слабоокруглыми контурами. В минеральных агрегатах часто гипидиоморфные. По отношению к нерудным минералам хромшпинелиды более идиоморфные. Хромшпинелиды разбиты многочисленны-

Таблица 2
Компонентный состав хромшпинелидов (по данным РСМА)

Компо- ненты	Серпентиниты			Интенсивно измененные серпентиниты				
	центр → периферия			центральная часть зерна		кайма		
SiO ₂	0,07	0,17	0,02	0,26	0,21	0,15	0,15	0,17
TiO ₂	0,12	0,12	0,03	0,08	0,05	0,12	0,02	0,15
Cr ₂ O ₃	58,63	58,69	61,19	60,38	61,10	58,63	63,94	66,26
Al ₂ O ₃	9,68	9,19	8,89	8,98	8,91	9,68	1,49	1,57
Fe ₂ O ₃	2,92	3,39	2,04	3,66	2,76	2,92	2,56	0,88
FeO	13,81	11,59	13,40	10,77	12,79	13,81	23,12	23,54
MnO	0,65	0,58	0,53	1,31	0,83	0,65	2,22	2,70
MgO	11,97	12,98	12,17	13,35	12,58	11,97	3,63	3,38
NiO	0,05	0,14	0,13	0,18	0,09	0,05	0,24	0,19
CoO	0,00	0,28	0,27	0,49	0,19	0,00	0,21	0,38
V ₂ O ₅	0,00	0,00	0,13	0,21	0,05	0,00	0,00	0,09
CuO	0,00	0,00	0,10	0,00	0,11	0,00	0,00	0,04
ZnO	0,13	0,14	0,10	0,16	0,00	0,13	0,18	0,09
Сумма	98,03	97,27	99,00	99,83	99,67	98,11	97,76	99,44

ми трещинами на отдельные, разной величины остроугольные или слабоокруглые фрагменты. По силе деформационных воздействий выделяется тонкая и грубая трещиноватость (рис. 5). Полости трещин частично выполнены серпентинитом, хлоритом, карбонатами или тальком.

Размер зерен хромшпинелидов достигает 1,6 мм при средних значениях 0,6–0,9 мм. Учитывая наличие грубой трещиноватости, разделяющей минеральные зерна на угловатые фрагменты, средний размер которых составляет 0,4–0,6 мм, можно утверждать, что максимальное раскрытие рудных минералов должно прослеживаться в классах крупности менее 1,0 мм.

Отдельные зерна слабо нарушенных хромшпинелидов обладают ровной поверхностью без видимых механических повреждений и включений. В то же время зерна хромшпинелидов из интенсивно преобразованных пород характеризуются проявлением бугорчато-ямчатых участков коррозии по контурам границ и вдоль трещин (рис. 3б).

Хромшпинелиды характеризуются оптической неоднородностью, связанной с элементами зональности окраски. Центральные и не трещиноватые части зерен просвечивают красновато-бурым цветом, а периферийные и вдоль трещин — черным (рис. 6). Такое различие в оптических свойствах обосновывается изменением компонентного состава хромшпинелидов (рис. 6, табл. 2).

По данным рентгеноспектрального микроанализа химический состав хромшпинелидов характеризуется незначительными вариациями. От центра к периферии зерна отмечается рост содержаний хрома и железа (суммарного) на фоне общего снижения количества алюминия и магния. В интенсивно преобразованных

породах хромшпинелиды неоднородны по своему составу, четко выделяются различия в составе центральной части зерна и каймы (рис. 3б), выраженные в вариации содержаний магния (13,35–3,38 %), железа (II) (10,77–23,54 %) и алюминия (8,98–1,49 %). Количество Cr₂O₃ колеблется в диапазоне от 58,63 до 66,26 %. Согласно классификации Н.В. Павлова, исследуемые разновидности хромшпинелидов относятся к хромиту [4].

Минералы, слагающие силикатную и рудную части аподунитового серпентинита, отличаются физико-механическими свойствами — твердостью, спайностью и ударной вязкостью, что предопределяет их поведение в процессе рудоподготовки. Силикатные минералы группы серпентинита обладают высокой ударной вязкостью и низкой твердостью, что приводит к их переизмельчению, более раннему выделению свободных

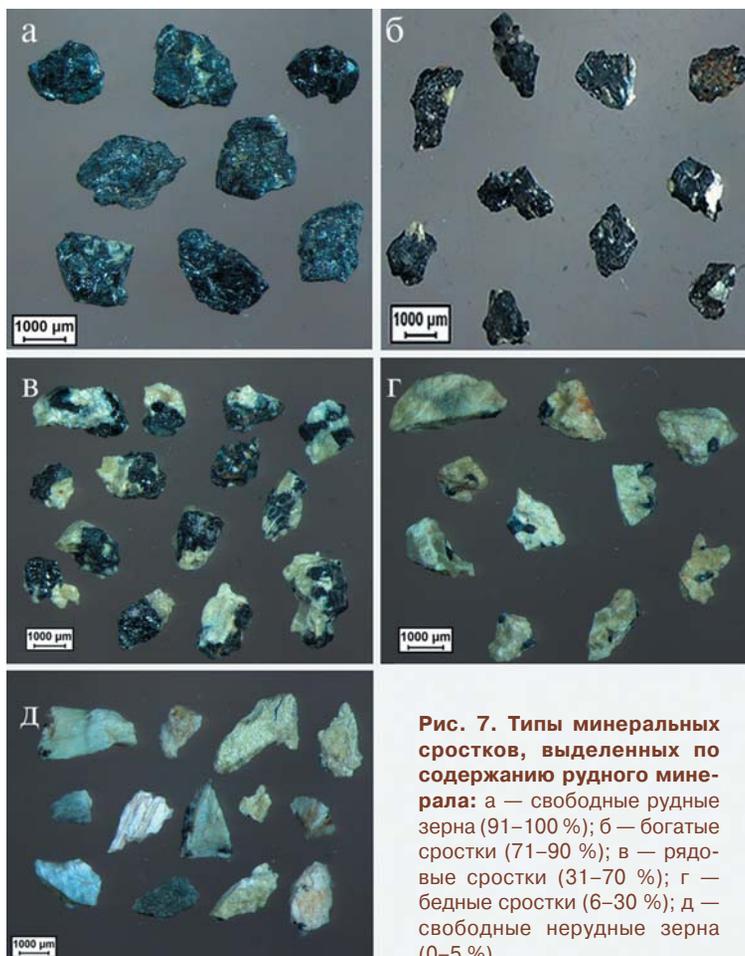


Рис. 7. Типы минеральных сростков, выделенных по содержанию рудного минерала: а — свободные рудные зерна (91–100 %); б — богатые сростки (71–90 %); в — рядовые сростки (31–70 %); г — бедные сростки (6–30 %); д — свободные нерудные зерна (0–5 %)

Таблица 3
Раскрытие рудных и нерудных минералов с учетом выхода классов крупности, %

Класс крупности	Выход, %	Свободные рудные зерна	Сростки			Свободные нерудные зерна
			богатые	рядовые	бедные	
-10+6	34,09	0,29	2,07	18,57	7,10	6,06
-6+2	33,34	0,19	1,23	15,47	5,25	11,20
-2+1	7,39	0,18	0,99	2,18	1,10	2,94
-1+0,5	11,81	1,88	2,12	1,49	0,88	5,44
-0,5+0,2	5,36	0,87	0,38	0,12	0,10	3,89
-0,2+0,1	2,55	0,65	0,11	0,09	0,02	1,68
-0,1+0,071	0,78	0,30	0,03	0,01	0,00	0,44
-0,071+0,044	1,21	0,45	0,04	0,02	0,00	0,70
Итого	96,53	4,81	6,97	37,95	14,45	32,35

зерен и образованию примазок и корочек, обволакивающих зерна рудных минералов.

Результаты исследования продуктов дробления

Характер раскрытия рудных и нерудных минералов в продуктах классификации определялся путем анализа распределения минеральных сростков в классах крупности -10+6; -6+2; -2+1; -1+0,5; -0,5+0,2; -0,2+0,1; -0,1+0,071; -0,071+0,044 мм. По содержанию рудного минерала в каждом классе были выделены пять основных типов сростков: свободные рудные зерна (91–100 %); богатые сростки (71–90 %); рядовые сростки (31–70 %); бедные сростки (6–30 %); свободные нерудные зерна (0–5) (рис. 7).

Морфология агрегатов свободных рудных зерен и богатых сростков имеет изометричную форму выделения, что непосредственно подчеркивает характерный облик хромшпинелидов. В таких агрегатах нерудные минералы присутствуют в подчиненном количестве и образуют примазки, небольшие скопления. Строение более бедных минеральных сростков неоднородное, рудная составляющая неравномерно распределена во всем объеме агрегатов, особенно это четко прослеживается в строении рядовых и бедных сростков.

Раскрытие рудных минералов (табл. 3) начинается только в классе крупности -2+1 мм и особо значительно в -1+0 мм, в то время как раскрытие нерудной фазы сначала идет достаточно равномерно с постепенным нарастанием до класса крупности -0,5+0,2 мм и последующим медленным снижением.

Характер направленности выделения свободных рудных и нерудных зерен продемонстрирован на схеме (рис. 8), на которой четко отражено начало раскрытия минеральных агрегатов в крупных классах с выделения нерудной составляющей, о чем свидетельствует расположение точек вдоль прямой СН. В классе крупности -1+0,5 мм прослеживается переломный момент, где фиксируется наличие как свободных нерудных зерен, так и рудных. В классах крупности -0,5+0,2 мм, -0,2+0,1 мм, -0,1+0,071 мм и -0,071+0,044 мм количество сростков не превышает 11 %, поэтому процесс раскрытия минералов можно отнести к весьма эффективному ($\eta=75\%$).

При анализе перспектив применения основных методов обогащения — гравитации и магнитной сепарации для переработки вкрапленной хромовой руды Аккаргинского месторождения, предварительно для разных типов минеральных сростков класса крупности -2+1 мм экспериментальным путем были установлены их плотностные и магнитные характеристики.

Плотность зерен минеральных сростков с разным содержанием рудного минерала определялась пикнометрическим методом согласно ГОСТ 5180-84 [1]. Результаты измерения позволили объединить минеральные сростки в три группы, что обусловлено разным соотношением рудной и нерудной составляющих сростков и изменчивостью минерального состава нерудной части (табл. 4). Различие в значениях плотности определяет возможность получения хромового концентрата методами гравитации.

Поведение разных типов минеральных сростков класса крупности -2+1 мм в магнитном поле оценивается по величине удельной магнитной восприимчивости зерен, участвующих в процессе разделения. При этом четко просматривается зависимость магнитных свойств зерен непосредственно от их строения, минерального состава и особенно от элементного состава хромита (табл. 5). Анализ полученных данных показывает, что значения удельной магнитной восприимчивости всех типов сростков лежат в одном диапазоне и не обеспечивают эффективности выделения хромового концентрата методами магнитной сепарации.

Обсуждение результатов

Оценка вкрапленной руды Аккаргинского месторождения методами технологической минералогии позволила дать прогнозную оценку ее обогатимости. Руда характеризуется средне- и мелковкрапленным

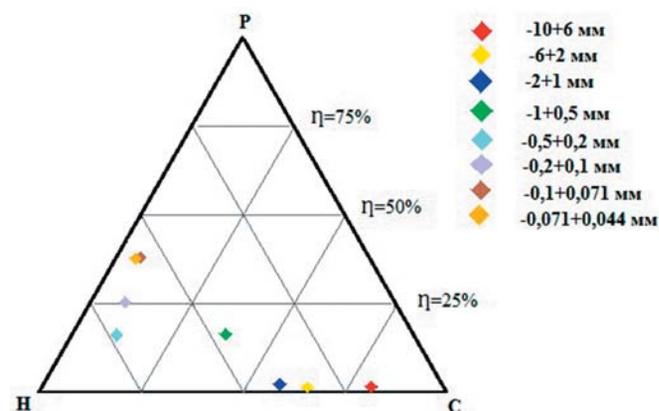


Рис. 8. Схема раскрытия рудных и нерудных минералов с учетом эффективности обогащения (η): С — минеральные сростки, H — свободные нерудные зерна, P — свободные рудные зерна

Таблица 4
Плотность минеральных сростков

Тип сростков	Плотность, г/см ³
Свободные рудные зерна	4,64
Богатые сростки	4,24
Рядовые сростки	3,63
Бедные сростки	3,25
Свободные нерудные сростки	2,45

Таблица 5
Значения удельной магнитной восприимчивости разных типов минеральных сростков

Тип сростков	$\chi \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$
Свободные рудные зерна	444
Богатые сростки	450
Рядовые сростки	631
Бедные сростки	558
Свободные нерудные сростки	315

строением с равномерным распределением рудного минерала, что подчеркивает низкую степень ее контрастности и обуславливает неэффективность применения методов кускового предобогащения.

Хромит является единственным рудным минералом с постоянным химическим составом: Cr_2O_3 — 58–61 %, Al_2O_3 — 8–11 %, MgO — 11–13 % и $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ — 14–17 %. Участками фиксируются небольшие проявления более железистой ($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ — 24–26 %) разновидности хромита. Средний размер зерен хромита составляет 0,6–0,9 мм. Наличие грубой трещиноватости, разделяющей минеральные зерна на угловатые фрагменты со средним размером 0,4–0,6 мм, снижает класс крупности раскрытия рудных зерен до 1,0 мм.

В классах крупности $-0,5+0,2$ мм, $-0,2+0,1$ мм, $-0,1+0,071$ мм и $-0,071+0,044$ мм количество минеральных сростков не превышает 11 %, а количество свободных рудных зерен увеличивается до 38 %, что позволяет процесс раскрытия минералов в данных классах крупности отнести к весьма эффективному ($\eta=75\%$).

Оценка плотности и удельной магнитной восприимчивости для разных типов сростков, полученных экспериментальным путем, позволила рекомендовать в качестве основного метода обогащения руд гравитационный. Таким образом, настоящее исследование показывает возможность предварительной оценки вкрапленных хромовых руд методами технологической минералогии.

Авторы выражают благодарность Ожогойной Е.Г. за ценные советы и плодотворное обсуждение результатов исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. — М., 1985.
- Кузьмин, В.И. Комплексование минералогических методов исследования при лабораторных испытаниях технологических проб / В.И. Кузьмин / Применение технологической минералогии для повышения эффективности использования минерального сырья: Сб. научных трудов. — М.: ВИМС, 1997. — С. 125–132.

- Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Хромовые руды. Утверждены распоряжением МПР России от 05.06.2007 г. № 37-р.
- Павлов, Н.В. Хромиты Кемпирсайского плутона / Н. В. Павлов, Г.Г. Кравченко, И.И. Чупрынина. — М.: Наука, 1968. — 178 с.
- Пирогов, Б.И. Системное минералого-технологическое исследование руд в связи с их обогащением / Б.И. Пирогов // Разведка и охрана недр. — 2019. — № 2. — С. 41–50.
- Проект на выполнение работ по объекту: Проведение разведочных работ на хромовые руды в границах Аккаргинского участка. Кн. 1. — Красноярск, 2018. — 105 с.
- Реестр хромитопоявлений в альпинотипных ультрабазитах Урала. — Пермь: КамНИИКИГС, 2000. — 474 с.
- Савельев, Д.Е. Хромиты Аккаргинского массива (Южный Урал) / Д.Е. Савельев, И.И. Мусабилов // Вестник Пермского университета. Геология. — 2018. — Т. 17. — № 1. — С. 61–74.
- Технологическая оценка минерального сырья. Опробование месторождений. Характеристика сырья: Справочник / Под. ред. П.Е. Остапенко. — М.: Недра, 1990. — 272 с.

© Коллектив авторов, 2019

Горбатова Елена Александровна // lena_gorbatova@mail.ru
 Пирогов Борис Иванович // pirogov_bi@inbox.ru
 Раков Леонид Тихонович // rakovlt@mail.ru
 Киселев Александр Александрович // a.kiselev11@mail.ru
 Иоспа Анастасия Владимировна // ada_heals@mail.ru
 Чепрасов Игорь Владимирович // i.v.cheprasov@yandex.ru

УДК 622.24

Борисов К.А., Третьяк А.А., Сидорова Е.В. (Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова)

ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА БУРОВЫХ ДОЛОТ, АРМИРОВАННЫХ PDC

*Дано описание решений, позволяющих добиться уменьшения износа и поломок породоразрушающего инструмента (ПРИ), армированного PDC (polycrystalline diamond cutter) за счет подбора смазки в растворе, воздействия физическими полями (постоянные магниты), антивибрационной конструкции долот, оптимизации технологических параметров бурения скважин (Pк Н, N об/мин, Q л/мин). **Ключевые слова:** прочностные свойства долот PDC, вибрации долота, буровой раствор, крутильная вибрация, осевая вибрация, поперечная вибрация.*

BorISOV K.A., Tretyak A.A., Sidorova E.V. (Platov South-Russian State Politechnical University (NPI))

IMPACT OF VIBRATIONS ON STRENGTH PROPERTIES OF DRILL BITS REINFORCED BY PDC

*The description of solutions to reduce wear and breakage of rock cutting tool, the reinforced polycrystalline diamond cutter due to selection of lubricant in solution, the impact of physical fields (permanent magnets), anti-vibration design bits, optimization of technological parameters of drilling (P,(N), N,(rpm), Q,(lpm)). **Keywords:** strength properties of PDC bits, bit vibrations, drilling mud, torsional vibration, axial vibration, transverse vibration.*

Вибрации долота являются основной причиной повышенного износа и поломок резцов PDC. На долото воздействуют различные типы вибраций в зависимости