

УДК 622.7 : 549.2

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ И ПЕРВИЧНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ
МАГНЕТИТОВОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО**

М. А. Гурман, Л. И. Щербак

*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: mgurman@yandex.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Представлены результаты минералого-технологических исследований магнетитовой руды месторождения Поперечного (Малый Хинган). Изучен минеральный состав и структурно-текстурные особенности руды, определены признаки ее контактово-метасоматического происхождения. Выявлены две генерации магнетита. Экспериментально подтверждена возможность извлечения в концентраты и промпродукт 94.39 % железа, в том числе в концентраты — 78.72 %, в промпродукт — 15.67 %. Содержание железа в черновых концентратах составляет 40.74–42.74 %. В руде установлена благороднометалльная минерализация: золото представлено свободными зернами крупностью 0.05–0.2 мм; платина и платиноиды (Os, Ir, Ru) выявлены в виде микровключений в магнетитовых джеспилитах и доломитах в составе концентратов.

Магнетитовая руда, джеспилиты, магнетит, магнитное и гравитационное обогащение, черновые концентраты, золото, платина

DOI: 10.15372/FTPRPI20180316

Россия обладает крупной железорудной базой. Высококачественные руды, содержащие более 60 % железа, составляют лишь четверть запасов страны, при этом значительная их часть не осваивается из-за сложных горнотехнических условий. Остальные запасы отечественных руд содержат от 16 до 40 % железа и уступают богатым рудам месторождений Бразилии, Австралии, Индии с содержанием 40–66 % Fe [1–5]. Возрастание объемов добычи и потребления железных руд обуславливает необходимость ввода в эксплуатацию месторождений с бедными рудами, которые не могут быть использованы без предварительного обогащения. Перспективы увеличения добычи железных руд в России связаны с месторождениями Дальнего Востока (Малый Хинган и Южная Якутия), на базе которых формируются территориальные комплексы переработки железорудного сырья [1]. В Дальневосточном регионе выделено 8 железорудных и марганцево-железорудных провинций и 45 железорудных районов в их пределах. Наиболее крупные месторождения железных руд Хинганского рудного района (Кимканское, Сутарское, Костеньгинское) представлены железистыми кварцитами преимущественно магнетитового и гематит-магнетитового типа [2, 6, 7]. На месторождениях железомарганцевых руд Южно-Хинганской группы (Поперечном, Серпуховском, Гематитовом, Охринском, Безымянном и др.) железные руды, сопутствующие марганцевым, состоят в основном из гематитовых микро-

кварцитов. Магнетитовые кварциты менее распространены [2], однако их значение возрастает при разработке технологий обогащения. Магнитные свойства полезных минералов в рудах различного типа изменяются в широких пределах. Минералы, отличающиеся магнитной восприимчивостью, невозможно извлечь одним процессом, но отдельная переработка руд на месторождении не всегда возможна. В связи с этим при совместной переработке железомарганцевой и железной руды (с учетом специфики вещественного состава) извлечение ценных компонентов может осуществляться комбинацией различных методов.

Настоящие исследования направлены на выявление минерального состава и структурно-текстурных особенностей магнетитовой руды месторождения Поперечного для выбора методов ее первичной переработки, а также концентрации благородных металлов [8–10]. Полученные результаты могут быть использованы при решении вопроса о совместной переработке гематит-браунитовой и магнетитовой руды. Предложенная ранее схема переработки железомарганцевой руды [11] может быть в дальнейшем скорректирована введением цикла доводки черного магнетитового концентрата.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований служила технологическая проба магнетитовой руды, отобранная на железомарганцевом месторождении Поперечном Южно-Хинганского рудного узла. Подготовка пробы включала операции стадийного дробления, грохочения, перемешивания, отбора навесок для проведения минералого-технологических исследований и различных анализов. Изучение исходной руды и продуктов обогащения выполнялось петрографическими и минералогическими методами с применением оптической и электронной микроскопии. Содержание железа определялось спектрофотометрическим методом. Для количественного определения золота использованы спектральный, атомно-эмиссионный и атомно-абсорбционный анализы. Состав продуктов обогащения изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА). Технологические исследования руды проводились в соответствии с установленным вещественным составом. Магнитное обогащение осуществлялось мокрым способом в слабом поле. Магнитный концентрат подвергался пересортировке, немагнитная фракция после контрольной сепарации рассеивалась на классы ($-2 + 1$; $-1 + 0.5$; $-0.5 + 0.2$; $-0.2 + 0$ мм), и классифицированный материал подавался на концентрационный стол. Включение операций гравитационного обогащения в схему переработки руды ориентировано также на концентрацию благородных металлов. Продукты обогащения направлялись на минералогический анализ и после выделения из концентратов зерен золота крупнее 0.05 мм — на химический анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам химического анализа исходной пробы доля железа в руде составляет 30.33 %; марганца — 1.88 %; содержание кремнезема — 54 %; другие оксиды, %: TiO_2 — 0.24; MgO — 5.24; CaO — 4.45; Al_2O_3 — 2.70; K_2O — 0.25; Na_2O — 0.18. Отмечается присутствие элементов: Co — 0.1, Ni — 0.1, V — 0.1, Cr — 0.03, Ba — 0.02 %. Содержание вредных примесей: S — 0.03; P_2O_5 — 0.31 %. Гранулометрический анализ руды, раздробленной до 2 мм, показал практически равномерное (на уровне исходной руды) распределение железа по классам крупности (рис. 1).

Минералого-петрографическими исследованиями в составе руды выявлены рудные компоненты и их сростания, рудовмещающие породы и акцессории, а также минералы наложенных прожилков и гнездовидных обособлений. В составе исходной пробы минералогическим анализом выявлено 73н золота размером 0.05–0.1 мм. Количественный минералогический анализ исходной пробы магнетитовой руды представлен в табл. 1.

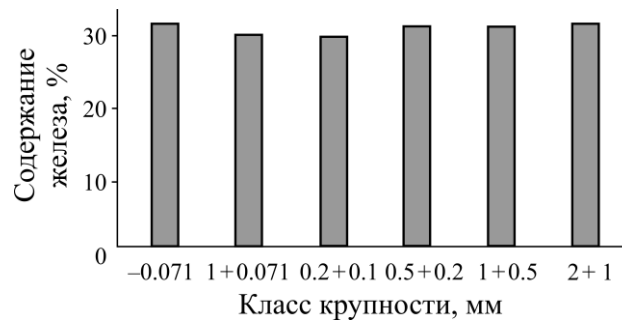


Рис. 1. Содержание железа в исходной руде по классам крупности

ТАБЛИЦА 1. Количественный минералогический анализ исходной магнетитовой руды месторождения Поперечного

Минералы и горные породы	Класс крупности, мм						Итого
	Содержание компонентов руды, %						
	-2 +1	-1 +0.5	-0.5 +0.2	-0.2 +0.1	-0.1 +0.071	-0.071	
Рудные компоненты							
Золото (зн)	—	—	1	3	2	1	7
Магнетит (кристаллы и агрегаты)	—	—	—	0.77	1.91	1.07	3.75
Магнетитовые джеспилиты 50–60 % магнетита	7.84	10.6	13.1	7.21	3.01	2.07	43.83
Магнетитовые джеспилиты 30–40 % магнетита	0.33	1.06	1.51	1.51	0.34	0.12	4.86
Магнетитовые джеспилиты 20 % магнетита	0.31	1.50	1.43	0.92	0.23	0.26	4.65
Гематит-магнетитовые джеспилиты							
10 % магнетита	2.12	0.30	0.74	1.69	—	0.04	4.89
Гематитовые джеспилиты	1.30	0.12	0.17	0.28	0.03	0.30	2.20
Пелитоморфные доломиты 5–15 % магнетита	1.10	0.38	0.87	1.60	0.10	—	4.05
Рудные сростки							
Магнетит + кварц + кальцит	1.10	0.20	0.30	0.13	0.20	—	1.93
Магнетит + гематит + кальцит + кварц	0.70	0.06	0.02	0.26	—	—	1.04
Магнетит + пирит + кварц	2.24	0.10	0.50	0.36	—	—	3.20
Родохрозит + кальцит + магнетит	0.93	—	—	—	—	—	0.93
Рудовмещающие породы							
Доломиты, известняки, мергели, глинистые сланцы с обособлениями гематита, кальцита, кварца	4.88	2.51	2.32	2.36	0.88	0.90	13.85
Яшмовидные джеспилиты < 5 % магнетита, яшмы, брекчии	0.004	1.35	0.01	0.09	0.001	—	1.45
Минералы прожилков и гнездовидных обособлений							
Кварц, кварц + кальцит	0.08	—	0.45	1.63	0.61	0.18	2.95
Кальцит	0.16	0.24	0.84	0.73	0.41	0.32	2.70
Родохрозит, тремолит, хлорит, асбест, тальк, брусит, галлуазит	0.8	0.47	0.01	0.64	0.13	0.11	2.16
Пирит, браунит	—	0.31	0.01	0.84	0.12	0.17	1.45
Аксессуары							
Циркон, апатит, сфен, ортит, гранат	—	—	зн*	0.03	0.02	0.05	0.10
Угlistое вещество	—	—	рз**	рз	зн	зн	рз
Итого, %	23.89	19.2	22.28	21.05	7.99	5.59	100.0

*зн — знаки

**рз — редкие зерна

Свободного магнетита в руде выявлено не более 5 %, основную массу исследуемой пробы составляют магнетитовые джеспилиты с содержанием магнетита 50–60 %. Это тонкослоистые породы, в которых прослой магнетита чередуются с прослоями кварца. В отличие от классических джеспилитов, в них нередко присутствуют прослой карбоната мощностью 0.1–0.5 мм. Микрокристаллическая и микрогранобластовая структура, тонко- и обломочно-слоистая, реже микроскладчатая, тонко- и милонито-сланцеватая текстура руды распознается под микроскопом.

Магнетитовые джеспилиты, содержащие 30–40 % и менее 20 % магнетита, гематит-магнетитовые и гематитовые с вкрапленностью магнетита играют подчиненную роль. Пелитоморфные магнетитсодержащие доломиты и известняки присутствуют в руде в малых количествах, магнетит образует в них прослой мощностью 0.1–0.2 мм.

Главный рудный минерал — магнетит в руде присутствует в двух генерациях: в виде метакристаллических агрегатов, прослоев (0.1–1.2 мм) и отдельных метакристаллов в виде вкрапленности в джеспилитах. Магнетит I — кубические и октаэдрические метакристаллы размером 0.001–0.01 мм образуют прослой до 0.2 мм мощностью в магнетитовых и гематитовых джеспилитах. Магнетит II — октаэдрические метакристаллы размером 0.01–0.1 мм наблюдаются в виде вкрапленности среди магнетита I и в гематитовых джеспилитах (рис. 2, 3).

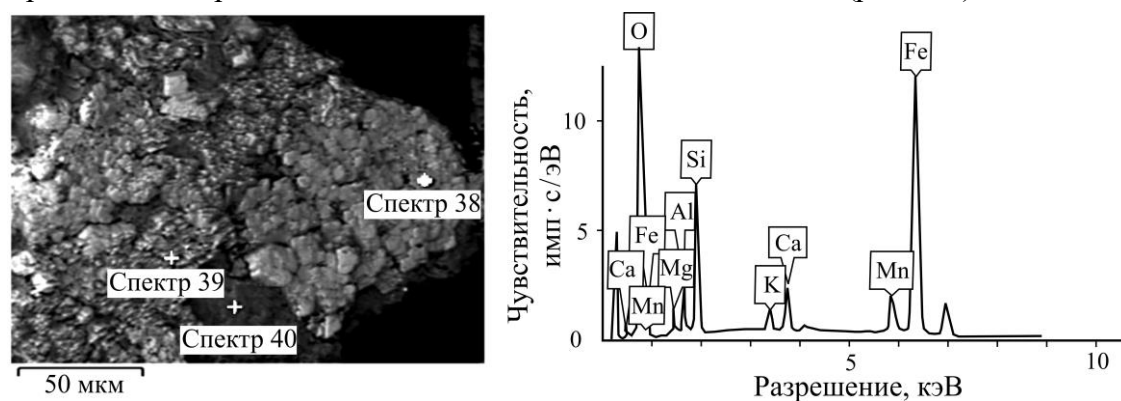


Рис. 2. Метакристаллическая микроструктура прослоя магнетита I из концентрата (спектр 38)

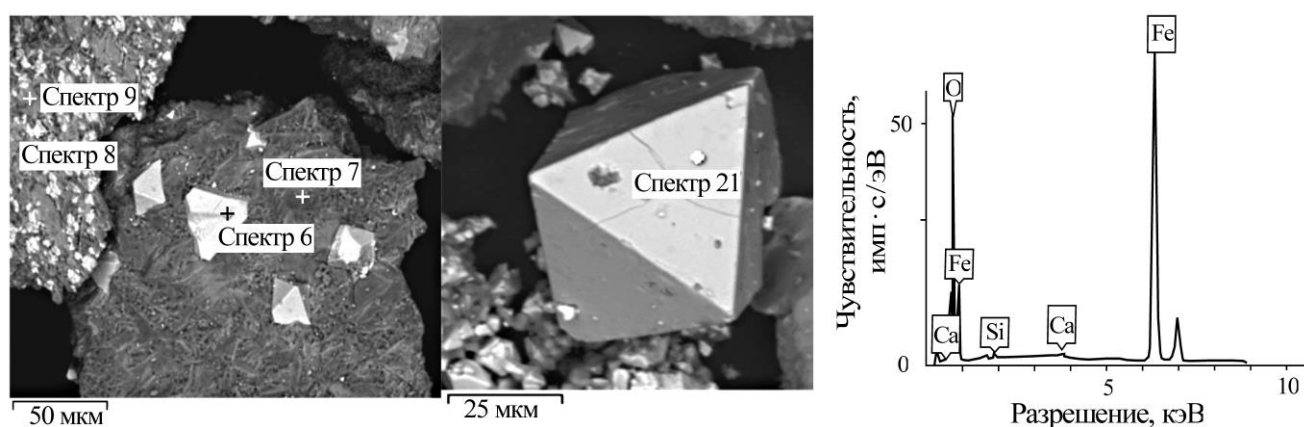


Рис. 3. Включения идиоморфных октаэдрических метакристаллов магнетита II в тонкозернистом джеспилите в составе концентрата (спектр 21)

Гематит присутствует в руде в незначительном количестве (7–8 %), в гематитовых джеспилитах кирпично-красного цвета, в пелитоморфных доломитах — черный. Форма: агрегаты, гнезда, зернистые обособления, скопления листоватой железной слюдки (0.01–0.1 мм). Во всех классах крупности наблюдаются минеральные сростания: магнетит-кварцевые, магнетит-кварц-кальцитовые, магнетит-пирит-кальцитовые, магнетит-родохрозитовые.

Рудовмещающими породами являются пелитоморфные доломиты, известняки, доломитовые брекчии, редко мергели, глинистые и углисто-магнетитовые сланцы, яшмовидные гематитовые джеспилиты и яшмы. Пелитоморфные доломиты как магнетитсодержащие, так и безрудные имеют серый, темно-серый до черного цвет, массивную текстуру. В них часто наблюдается вкрапленность магнетита и пирита, а также гнездовидные обособления кальцита, кварца, тремолита, кристаллы актинолита, скопления чешуек талька. Углистое вещество в пелитоморфных доломитах и известняках присутствует в виде комковатого и микрочешуйчатого графита и составляет ~ 0.5 %. Аксессуары: циркон, апатит, сфен, ортит, гранат.

Скарнирование вмещающих пород заметно даже макроскопически: в обломках доломитов и брекчий по многочисленным прожилкам и трещинам осаждались пленки талька, придающие им белесый налет и омыленность. Присутствие доломитов связано, вероятно, с привнесом магния в процессе скарнирования в зоне глубинного разлома.

Рентгеноструктурным анализом в исходной руде и продуктах обогащения выявлен ряд минералов, важных в понимании генезиса руды, их характеристика приведена в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Минералы, выявленные рентгеноструктурным анализом

Минерал	Условия нахождения
I группа — высокотемпературные минералы контактово-метасоматических зон	
Герцинит $FeAl_2O_4$	Шпинелид железа ассоциируется с магнетитом, альмандином в контактово-метасоматических месторождениях среди мраморизованных известняков
Альмандин $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	Скарновый минерал — продукт реакции кислой магмы с известняками и доломитами, богатыми железом и алюминием
Якобсит $MnFe_2O_4$	В контактово-метасоматических, гидротермальных, метаморфических месторождениях железа и марганца
Тремолит $Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2 \cdot 3H_2O$ Бишулит	Скарновый минерал в известняках и доломитах Спутанно-волокнистая разность тремолита
Гельвин $Mn_8[S_2(BeSiO_4)_6]$	В прожилках родохрозита, контактовых зон гранитов с известняками, иногда является рудой бериллия
Геленит $Ca_2Al(SiAl)O_7$ Чароит $(CaBaSr)_5(KNa)_{3-4}[Si_{12}O_{30}]_2(OH,F)_2 \cdot nH_2O$	Контактово-метасоматический среди известняков В скарнах, редко встречающийся
II группа — низкотемпературные гипергенные минералы	
Гроутелит-гроутит MnO_2	В железных рудах ассоциируется с кварцем, гематитом, гетитом
Свитцерит $Mn_3(PO_4)_3(SiO_4)_3Cl_2$	Ассоциирует с родохрозитом, пиритом, апатитом в железомарганцевых рудах (агрегаты, налеты, чешуйки)
Фриделит $(Mn,Fe)_8Si_6O_{15}(OH)_{10}$ Пиросмалит	Водный силикат. Встречается в железомарганцевых рудах Слюдоподобный силикат железорудных месторождений, ассоциирует с родохрозитом, хлоритом, баритом
Галлуазит $Al_4[Si_4O_{10}][OH] \cdot 4H_2O$	Водный силикат алюминия, образуется в зоне гипергенеза
Неонокит $(Mn,Mg,Fe)_2O_3SiO_3 \cdot H_2O$	Гидратированный силикат железо-марганцевых месторождений (зона гипергенеза)

Представленные в табл. 2 минералы I группы (герцинит, альмандин, якобсит, тремолит, гельвин, чароит) указывают на высокотемпературные условия формирования магнетитовой руды в зоне контактово-метасоматических изменений. Минералы II группы (гроутелит-гроутит, свитцерит, фриделит, пиросмалит, галлуазит, неонокит) характеризуют гипергенные изменения в магнетитовой руде. Они наблюдаются в виде прожилков, налетов, чешуйчатых обособлений. Наиболее распространенным минералом является галлуазит, который нередко входит в состав микрокварцитовых прослоев магнетитовых джеспилитов как вторичный минерал.

Минералого-петрографическое и электронно-микроскопическое исследования магнетитовой руды позволили выявить признаки ее контактово-метасоматического происхождения: 1) скарнирование вмещающих доломитов из зоны брекчирования в виде многочисленных прожилков и обособлений асбеста, талька, тремолита, актинолита; доломитизация, вероятно, связана с метасоматическими процессами в зоне глубинного разлома; 2) метакристаллическая структура магнетита; 3) присутствие в составе руды высокотемпературных минералов, свойственных для зон контактово-метасоматических изменений.

Технологические свойства исследуемой магнетитовой руды обусловлены особенностями вещественного состава. Способы обогащения зависят от магнитных свойств и характера вкрапленности полезного минерала. Основное количество железа в руде находится в форме магнетита. По магнитной восприимчивости магнетит является сильномагнитным, для его концентрации необходимо применение слабого магнитного поля. Поскольку магнетит представлен тонкой и весьма тонкой вкрапленностью в джеспилитах и образует тесные взаимные сростания с минералами вмещающих пород, для получения кондиционных концентратов предполагается тонкое измельчение руды перед обогащением.

Различие в плотностях рудных минералов (магнетит, гематит) и минералов вмещающих пород (кварц, кальцит, доломит) позволяет применять операции гравитационного обогащения исходя из структуры руды, в концентрат могут переходить агрегаты рудных минералов. Наличие в руде свободного золота предопределяет возможность его концентрации и выделения также с использованием гравитационных методов.

Микрометакристаллическая и микрогранобластовая структура, тонкослоистая и сланцеватая текстура руды при неравномерном чередовании прослоев магнетита и кварца обуславливают применение многостадийной технологической схемы с перечистками промпродуктов. Таким образом, наличие минералов, обладающих магнитными свойствами, присутствие благородных металлов, различие в плотностях разделяемых рудных и нерудных минералов предполагают комбинирование магнитных и гравитационных методов обогащения магнетитовой руды.

С целью получения магнетитовых концентратов и отвальных хвостов, а также концентрации и выделения благородных металлов разработана схема первичного обогащения руды. Исходная проба после дробления до 2 мм подвергалась магнитной сепарации с контрольной сепарацией хвостов и перечисткой магнитной фракции (магнитная индукция — 300–330 мТл). В результате получен черновой магнитный концентрат и промпродукт. Материал немагнитной фракции подвергнулся классификации и обогащению на концентрационном столе для доизвлечения минералов железа и концентрации благородных металлов; наряду с концентратами предусматривалось выделение «головок» (рис. 4).

В результате магнитного обогащения грубоизмельченной руды в магнитную фракцию извлечена основная часть железа — 92.59 %, в том числе 76.92 % Fe — в концентрат и 15.67 % — в промпродукт. Гравитационным обогащением из немагнитной фракции дополнительно извлекается 1.8 % железа. Содержание железа в магнитном концентрате составляет 41.01 %, в концентратах стола — 39.61–44.12 %, что соответствует черновым концентратам. В промпродукте магнитной сепарации содержание железа — 19.07 %. При этом 16.85 % руды с содержанием 10.1 % Fe (и запасом металла 5.61 %) выведено в хвосты (табл. 3).

На практике для доизвлечения железа из хвостов обогащения в слабом магнитном поле существуют два направления: включение флотации в схему обогащения или складирование отходов в хвостохранилищах для последующей вторичной переработки.

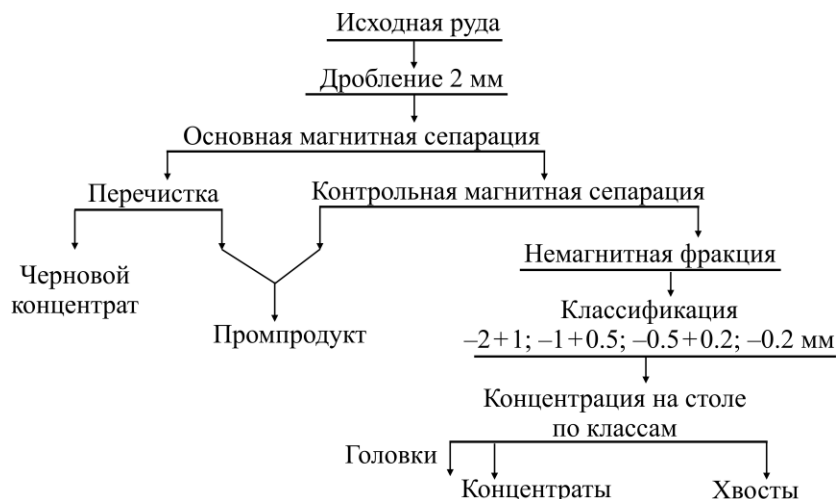


Рис. 4. Магнитно-гравитационная схема первичного обогащения магнетитовой руды

ТАБЛИЦА 3. Технологические показатели обогащения магнетитовой руды

Продукт	Выход, %	Содержание		Извлечение Fe, %
		Fe, %	Au, г/т; Zn	
Исходная проба	100.00	30.33	—	100.0
Основная и контрольная магнитная сепарация				
Черновой магнитный концентрат	56.89	41.01	0.020	76.92
Промпродукт, магнитная фракция	24.92	19.07	0.020	15.67
Немагнитная фракция	18.19	12.36	—	7.41
Итого	100.00	30.33	—	100.0
Концентрация на столе немагнитной фракции				
Немагнитная фракция	18.19	12.39	—	7.41
-2+1 мм	Головка, концентрат	0.24	42.05	0.028
	Хвосты	10.02	9.44	—
	Итого	10.26	10.20	—
-1+0.5 мм	Головка, концентрат	0.61	39.61	0.031
	Хвосты	2.62	10.21	—
	Итого	3.23	15.77	—
-0.5+0.2 мм	Головка, концентрат	0.36	41.18	0.031
	Хвосты	1.74	12.20	—
	Итого	2.10	17.33	—
-0.2 мм	Головка	0.02	30.33	19 Zn
	Концентрат	0.11	44.12	14 Zn
	Хвосты	2.47	11.19	0.004
	Итого	2.60	12.72	—
Итого концентрация на столе				
Концентрат	1.34	40.74	33 Zn	1.80
Хвосты	16.85	10.10	—	5.61
Немагнитная фракция	18.19	12.36	—	7.41
Конечные продукты обогащения				
Черновой магнитный концентрат	56.89	41.00	0.020	76.92
Концентраты стола	1.34	40.74	33 Zn	1.80
Промпродукт, магнитная фракция	24.92	19.07	0.020	15.67
Хвосты	16.85	10.10	—	5.61

По результатам минералогического анализа черновой магнитный концентрат состоит из джеспилитов, содержащих 50 – 60 % магнетита, а также тонких сростков магнетита с кварцем и карбонатами, промпродукт содержит значительное количество вмещающих пород с вкрапленностью магнетита (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4. Минеральный состав продуктов обогащения

Продукт обогащения	Минеральный состав	Содержание, %
Черновой магнитный концентрат	Магнетит; магнетитовые джеспилиты (50 – 60 % магнетита); магнетит + карбонаты; магнетит + кварц; гематит-магнетитовые джеспилиты	55
	Магнетитовые джеспилиты (50 – 60 % магнетита); магнетит-гематитовые джеспилиты; пелитоморфные известняки	45 25 65 10
Промпродукт, магнитная фракция – 2 + 1 мм	Концентрация на столе немагнитной фракции	
	Гематит-магнетитовые джеспилиты (50 – 60 % магнетита), магнетитсодержащие доломиты; кальцит + магнетит, пирит, кварц + магнетит	88 12
Головка стола	Магнетитовые и гематит – магнетитовые джеспилиты; пелитоморфные доломиты с включениями магнетита; родохрозит с прослоями магнетита	96.5 3.0 0.5
	Гематитовые джеспилиты; пелитоморфные доломиты и известняки; углисто-сланцевые сланцы, мергели; родохрозит	1 79 19.4 0.6
Концентрат стола	Магнетитовые джеспилиты (50 – 60% магнетита) и магнетит + кальцит + кварц; магнетитсодержащие пелитоморфные доломиты; гематитовые джеспилиты с включениями магнетита; пирит и его сростки с кварцем и кальцитом	50 40 9.5 0.5
	Магнетитовые джеспилиты; гематитовые джеспилиты с включениями магнетита; родохрозит с примесью магнетита	46.5 53 0.5
Хвосты стола	Магнетитовые джеспилиты (20 – 30% магнетита); микрокварциты с включениями магнетита и кальцита	90 10
	Пелитоморфные доломиты и известняки, яшмы; магнетитовые джеспилиты (20 – 30 % магнетита)	99.7 0.3
Промпродукт стола	Магнетитовые джеспилиты (10 – 20 %), гематит-магнетитовые джеспилиты, доломиты, родохрозит с включениями магнетита; пелитоморфные доломиты и известняки с включениями магнетита, гематитовые джеспилиты, пирит	90 10
	Магнетитовые джеспилиты (20 – 30 % магнетита); пелитоморфные известняки, доломиты, микрокварциты	10 90
Головка стола	Магнетит и магнетитовые джеспилиты (50 – 60 % магнетита); золото, 0.05 – 0.2 мм	95 Au — 19zn
	Магнетит и магнетитовые джеспилиты (50 – 60 % магнетита); магнетитовые джеспилиты (20 – 30 % магнетита); золото: 1) 4 zn — 0.2 – 0.5; 2) 10zn — 0.005 – 0.2 магнетита	80 20 Au — 14zn
Концентрат стола	Магнетитовые джеспилиты (20 – 30 % магнетита); пелитоморфные известняки, кварц, гематитовые джеспилиты	25 75
	Магнетитовые джеспилиты (10 – 20 % магнетита); известняки, доломиты, микрокварциты, яшмы; шламы	20 20 60

Вкрапленность магнетита в джеспилитах весьма тонкая, поэтому для повышения качества полученных концентратов и включения в цикл переработки руды промпродукта требуется тонкое и весьма тонкое измельчение. Для получения кондиционных концентратов будут отработаны схемы измельчения перед отдельными стадиями обогащения, а также определено их число для выведения вмещающей породы в хвосты и количество перечисток концентрата и промпродукта.

Благороднометалльная минерализация в магнетитовой руде представлена золотом, платиной и элементами платиновой группы. Золото выявлено минералогическим анализом в исходной руде (7 знаков), в “головке” (19 знаков) и концентрате стола (14 знаков) при обогащении на концентрационном столе фракции крупностью менее 0.2 мм. Форма золота пластинчатая, комковатая, изометричная, чешуйчатая; края зерен мягко сглажены; размеры золотин 0.05–0.2 мм, крайне редко 0.2–0.5 мм; цвет — желтый, светло-желтый, иногда с красноватым и зеленоватым оттенком. Поверхность неровная, бугорчатая, в ямках отмечаются черные налеты. В составе золота присутствует примесь серебра. Электронно-микроскопические изображения золота, извлеченного в “головки” и концентраты стола из магнетитовой руды, приведены на рис. 5.

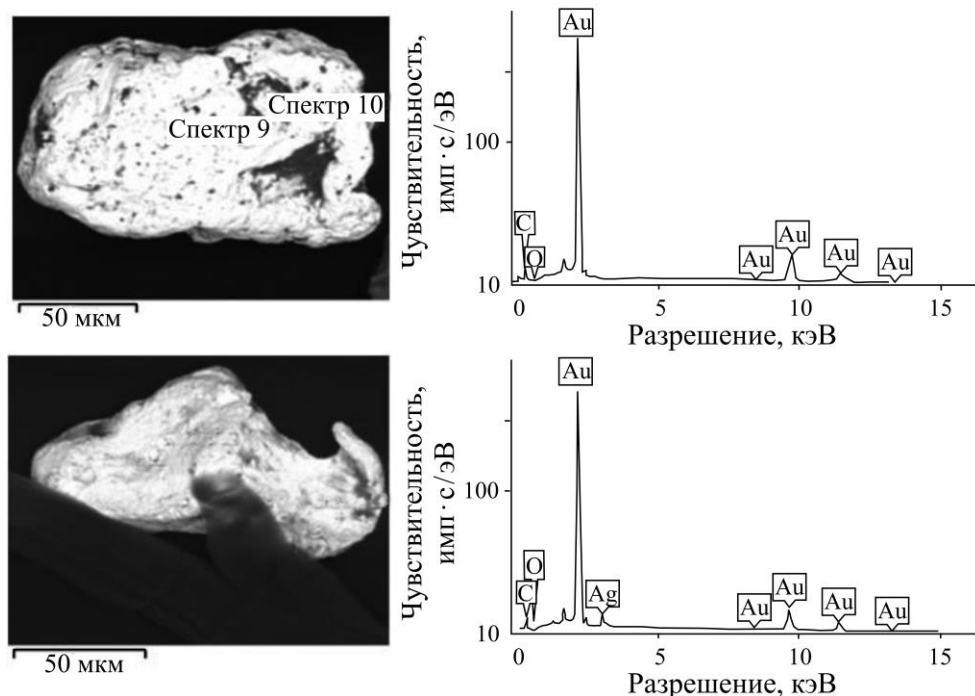


Рис. 5. Золото, выделенное из гравитационных концентратов магнетитовой руды (спектры 9, 12)

Платиновая минерализация (Pt, Os, Ir, Ru) выявлена в виде микровключений в магнетитовых джеспилитах и доломитах. Электронно-микроскопические изображения микровключений платины, осмия, иридия, рутения в концентратах магнитного и гравитационного обогащения представлены на рис. 6:

- спектр 100 — $Pt_{0.12}Fe_{0.68}Ca_{1.47}Mg_{1.53}Si_{0.51}C_{48.53}O_{47.35}$,
- спектр 101 — $Pt_{0.37}Ca_{14.38}Mg_{5.51}Si_{1.22}C_{41.27}O_{36.85}$,
- спектр 102 — $Pt_{0.49}Ca_{2.74}Mg_{3.20}Si_{14}C_{19.67}O_{59.90}$,
- спектр 103 — $Pt_{0.74}Ca_{8.79}Mg_{7.72}Si_{0.22}C_{23.45}O_{59.08}$,
- спектр 061 — $Ir_{0.46}Fe_{35.56}Ca_{0.29}Si_{9.69}Al_{1.41}Mg_{1.58}C_{6.44}O_{44.57}$,
- спектр 062 — $Pt_{0.37}Os_{0.51}Fe_{10.2}Si_{14}Al_{2.7}Mg_{3.21}C_{16}O_{53}$,
- спектр 064 — $Fe_{51.5}Ba_{0.43}Ca_{0.2}Si_{4.7}Al_{0.98}Mg_{0.9}C_5O_{41.53}$;

спектр 045 — $\text{Ir}_{1.61}\text{Fe}_{44.73}\text{Ca}_{0.75}\text{Si}_{3.57}\text{Al}_{1.27}\text{Mg}_{1.16}\text{C}_{4.92}\text{O}_{42}$;
 спектр 046 — $\text{Ir}_{0.27}\text{Fe}_{45.74}\text{Ti}_{0.25}\text{Si}_{2.15}\text{Al}_{1.0}\text{Mg}_{0.95}\text{C}_{5.46}\text{O}_{44.19}$;
 спектр 047 — $\text{Pt}_{0.21}\text{Fe}_{42.94}\text{Hg}_{0.35}\text{Si}_{3.72}\text{Al}_{0.89}\text{Mg}_{0.69}\text{C}_{6.48}\text{O}_{44.72}$;
 спектр 049 — $\text{Nd}_{5.39}\text{Pr}_{1.34}\text{Ce}_{8.79}\text{La}_{4.65}\text{Fe}_{55.86}\text{P}_{0.12}\text{Si}_{3.86}\text{Al}_{1.99}\text{Mg}_{1.59}\text{C}_{12.25}\text{O}_{4.14}$;
 спектр 050 — $\text{Ir}_{0.53}\text{Fe}_{44.91}\text{Si}_{6.53}\text{Al}_{0.92}\text{Mg}_{0.5}\text{Na}_{0.41}\text{C}_{4.07}\text{O}_{42.13}$;
 спектр 051 — $\text{Pt}_{0.17}\text{Fe}_{44.9}\text{Ti}_{0.31}\text{Ca}_{0.15}\text{Si}_{5.99}\text{Al}_{1.06}\text{Mg}_{0.74}\text{C}_{4.29}\text{O}_{42.4}$.

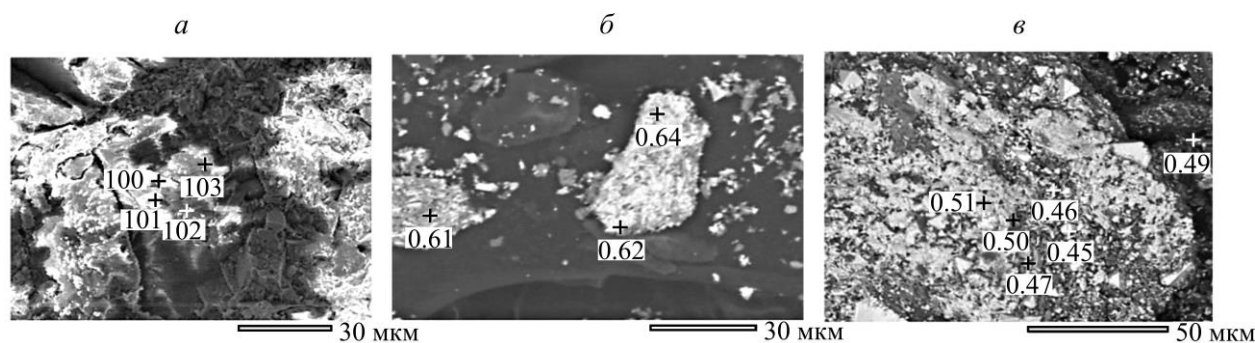


Рис. 6. Микровключения ценных металлов в магнетитовых джеспилитах: спектр 100, спектр 101, спектр 102, спектр 103; б — спектр 061, спектр 062, спектр 064; в — спектр 045, спектр 046, спектр 047, спектр 049, спектр 050, спектр 051

ВЫВОДЫ

Магнетитовая руда месторождения Поперечного представлена магнетитовыми джеспилитами с содержанием магнетита 50–60 %. Она характеризуется сложной микрометакристаллической и микрогранобластовой структурой и тонкослоистой, тонко- и милонито-сланцевой текстурой. Определены две генерации магнетита: I — метакристаллические агрегаты и прослойки (0.1–1.2 мм); II — отдельные метакристаллы в виде тонкой вкрапленности в джеспилитах. Признаки контактово-метасоматического происхождения руды проявлены в доломитизации и скарнировании рудовмещающих пород, в метакристаллической структуре магнетита и присутствии в составе руды высокотемпературных минералов. Экспериментально показана возможность извлечения 94.39 % железа в концентраты и промпродукт. В результате первичного обогащения в хвосты выведено 16.85 % руды с содержанием 10.1 % Fe (запас металла 5.61 %). Содержание железа в черновых концентратах составляет 40.74–42.74 %. В руде установлена благороднометалльная минерализация: золото, представленное свободными зернами крупностью 0.05–0.2 мм, — в гравитационных концентратах; платина и платиноиды (Os, Ir, Ru) выявлены электронно-микроскопическим анализом в составе концентратов в магнетитовых джеспилитах и доломитах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 г. / Министерство природных ресурсов и экологии РФ: Гос. докл. — М.: Минерал-Инфо, 2016. — С. 81–92.
2. Архипов Г. И. Минеральные ресурсы горнорудной промышленности Дальнего Востока. Стратегическая оценка возможностей освоения. — Хабаровск: ИГД ДВО РАН, 2017. — 820 с.
3. Carajas Iron Ore Mine, Mining Technology. <http://mining technology.com>.

4. **Iron Ore**, Department of Industry Innovation and Science. [http:// industry.gov.au](http://industry.gov.au).
5. **Krishna S. J. G., Patil M. R., Rudrappa C., Kumar S. P., and Ravi B. P.** Characterisation and processing of some iron ores of India, J. Inst. Eng. India, Ser. D., Metallurgical & Materials and Mining Engineering, Published online 2013. <https://www.researchgate.net>.
6. **Гзогян Т. Н., Гзогян С. Р.** Железистые кварциты Кимканского месторождения и их обогащение // ФТПРПИ. — 2017. — №1. — С. 149–157.
7. **Гурман М. А., Александрова Т. Н., Щербак Л. И.** Исследование обогатимости бедных железных руд // ГИАБ. — 2010. — № 4. — С. 289–297.
8. **Крюков В. Г.** Генетические особенности древних месторождений Малого Хингана // Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии: сб. докл. III Всерос. науч. конф.: в 2 т. — Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2014. —Т. 1. — С. 111–115.
9. **Моисеенко Н. В., Щипачев С. В., Санилевич Н. С., Макеева Т. Б.** Первые находки благородных металлов на Хинганском месторождении марганцевых руд (участок Поперечный) // Геология, минералогия и геохимия благородных металлов Востока России: новые технологии переработки благороднометалльного сырья. — Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2005. — С. 72–74.
10. **Ханчук А. И., Бердников Н. В., Черепанов А. А., Коновалова Н. С., Авдеев Д. В., Зазулина В. Е.** Благородные металлы в черных сланцах сутырской свиты и кимканской толщи (Буреинский массив). Тектоника и глубинное строение Востока Азии // VI Косыгинские чтения: докл. Всерос. конф. — Хабаровск, 2009. — С. 237–240.
11. **Гурман М. А., Щербак Л. И.** Комбинированные методы обогащения гематит-браунитовой руды // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 144–159.

Поступила в редакцию 10/VI 2018