

УДК (622.75.77 + 622.778) : 549.321

**КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ОБОГАЩЕНИЯ
ГЕМАТИТ-БРАУНИТОВОЙ РУДЫ**

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 исследования вещественного состава и технологических свойств железомарганцевой руды гематит-браунитового типа Южно-Хинганского месторождения Дальнего Востока России. Основным источником марганца в руде является браунит. Приведена минералого-петрографическая характеристика исходной руды и продуктов обогащения. В руде установлена благороднометаллическая минерализация; в составе золота выявлены примеси платины, серебра. Экспериментально подтверждена возможность получения марганцевых концентратов с содержанием 37.85–46.46 % Mn по комбинированной многостадийной схеме, включающей магнитную сепарацию в слабом и сильном поле и операции гравитационного обогащения.

Гематит-браунитовая руда, джеспилиты, магнитная сепарация, гравитационное обогащение, марганцевые концентраты, благороднометаллическая минерализация

DOI: 10.15372/FTPRI20180117

Марганцевые руды месторождений России имеют преимущественно низкое качество, среднее содержание марганца составляет 9–23 %, при этом в высокосортных рудах зарубежных месторождений ЮАР, Габона, Австралии, Бразилии, Индии — 40–45 % Mn [1]. Отечественные марганцевые руды представлены в основном бедными железистыми, кремнеземистыми и фосфористыми разновидностями. Большая часть руд относится к категории труднообогатимых. Такие руды характеризуются слоистыми, микро- и тонкополосчатыми, обломочными, брекчиевыми, цементными текстурами, неравномерно-, мелко- и тонкозернистыми структурами, тонкой вкрапленностью и дисперсными включениями рудных минералов, тесными сростаниями с минералами вмещающих пород, взаимными прорастаниями с минералами железа, их близостью по плотности и магнитной восприимчивости, значительным количеством кремния, железа, фосфора. Руды многих месторождений марганца отличаются сложным минеральным составом, в них обнаружены минералы меди, вольфрама, цинка, свинца, никеля, кобальта, мышьяка; выявлена благороднометаллическая минерализация [2–5].

На территории Дальнего Востока известно более десяти мелких месторождений и рудопроявлений марганца. Марганцевые месторождения расположены в Удско-Шантарском (Ирнимийское), Ванданском, Хинганском рудных районах. Проявления марганцевых руд имеются в Анюйском (Хабаровский край), Ботомском (Якутия) рудных районах, Итчайваямском, Кам-

чатском, Олюторском (Камчатский край) и в Магаданской области. Месторождения представлены марганцевыми и железомарганцевыми рудами (браунитовыми, гематит-браунитовыми, родохрозитовыми, гаусманитовыми, манганосидеритовыми, пиролюзит-псиломелановыми). Среднее содержание марганца составляет 11.3–21.6%. Наиболее изученными являются месторождение и рудопроявление Южно-Хинганского рудного узла — Поперечное и Серпуховское (Еврейская автономная область) с балансовыми запасами марганцевых руд 6.53 и 1.59 млн т соответственно [6]. Исследования геологического строения, вещественного состава и испытания обогатимости марганцевых руд проводились в 50-х годах прошлого столетия. Полученные сведения о рудах дополнены в настоящее время геохимическими, петрографическими, минералогическими, технологическими исследованиями с привлечением современных физико-химических методов [3, 5, 7–12]. По причине отсутствия в нашей стране богатых марганцевых руд, перспективы развития марганцеворудной базы связаны с созданием эффективных технологий переработки низкокачественных труднообогатимых руд на месторождениях с небольшими запасами. Исследование особенностей вещественного состава и разработка технологических схем получения марганцевых концентратов представляются актуальными [13–16].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследований представлена технологическая проба руды гематит-браунитового типа, отобранная на месторождении Поперечном Южно-Хинганского рудного узла. Исходная руда подвергалась стадийному дроблению, грохочению, перемешиванию, после этого выделялись навески для изучения вещественного состава и проведения технологических исследований. Изучение руды и продуктов обогащения выполнялось петрографическими и минералогическими методами с применением оптической и электронной микроскопии (стереомикроскопы Stemi 2000C, Stemi DV40; растровый электронный микроскоп LEO EVO 40HV). Содержание марганца и железа определялось спектрофотометрическим методом анализа по методике НСАМ 138-х (центральная лаборатория АО “Дальгеофизика”). Для количественного определения золота использованы пробирный, спектрохимический и эмиссионный спектральный, атомно-абсорбционный анализы (спектрограф PGS-2, спектрометры СТЭ-1, ДФС 8-2, ДФС 458, спектрометр AAnalyst-300). Состав полученных концентратов изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с помощью дифрактометра ДРОН-7.

Технологические исследования руды проводились в соответствии с установленным вещественным составом. Магнитное обогащение осуществлялось мокрым и сухим способами с использованием высокоиндуктивного сепаратора МБС-Л и индукционно-роликового сепаратора 138Т-СЭМ. Магнитная фракция подвергалась перечистке и доизмельчению. Обогащение немагнитной фракции руды выполнялось методами отсадки, концентрации на столе, центробежной сепарации. Отсадку проводили в диафрагмовой машине “Омск”. Подрешетный продукт отсадки подвергали рассеву на классы $-2 + 1$, $-1 + 0.5$, $-0.5 + 0.2$, $-0.2 + 0.0$ мм; затем классифицированный материал подавался на концентрационный стол СКО-0.5. Надрешетный продукт, хвосты отсадки и хвосты стола объединялись и подвергались центробежной сепарации с контрольной операцией и измельчением, затем классификации и обесшламливанию по классу 0.02 мм. Центробежная сепарация выполнялась на лабораторном концентраторе Knelson KC-MD3. Включение операций гравитационного обогащения в схему переработки руды ориентировано также на концентрацию и выделение благородных металлов. Все продукты обогащения направлялись на минералогический анализ и после выделения из концентратов зерен золота крупнее 0.05 мм — на химический анализ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основными элементами гематит-браунитовой руды являются марганец и железо. Доля Mn составляет 21.4 %, $Fe_{\text{общ}}$ — 6.66 %, SiO_2 — 45.43 %, другие оксиды, %: TiO_2 — 0.51, MgO — 9.32, CaO — 8.47, Al_2O_3 — 4.11, K_2O — 2.0, Na_2O — 1.49. Отмечается присутствие Ba — 0.4 %. Вредные примеси: сера и фосфор не превышают допустимых содержаний: S — 0.05 %, P_2O_5 — 0.11 %. По данным гранулометрического анализа, в исходной технологической пробе руды, раздробленной до 2 мм, наблюдается преимущественно равномерное распределение марганца и железа с небольшой концентрацией этих элементов во фракциях $-1 + 0.5$ и $-0.5 + 0.2$ мм. Результаты расчета баланса металлов по классам крупности согласуются с данными химического анализа исходной руды.

Минералого-петрографическим анализом установлено, что гематит-браунитовая руда характеризуется grano- и лепидогранобластовой структурой, контрастной неравномерно микро- и тонкополосчатой текстурой с мощностью прослоев от 0.1 – 1.0 до 300 мкм (рис. 1).

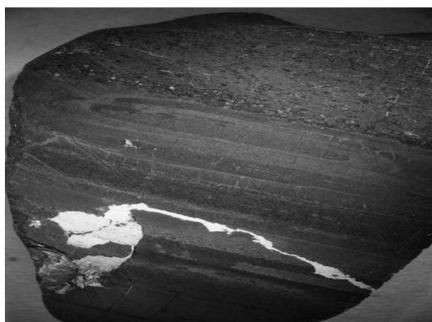


Рис. 1. Полированный образец тонкополосчатой гематит-браунитовой руды

Количественным минералогическим анализом выявлено, что исходная руда включает: 1 — браунит (иногда с примесью кварца, кальцита, гематита либо магнетита); браунит-гематитовые джеспилиты; родохрозит-карбонатные брекчии и родохрозит; 2 — гематитовые джеспилиты с тонкими прослоями (0.2 – 2 мм), гнездовидными обособлениями, вкрапленностью браунита, включениями тонкозернистого магнетита; гематитовые джеспилиты, переходящие в яшмы; 3 — магнетит-гематитовые джеспилиты нередко с тонкими прослоями гематитовых джеспилитов (0.2 – 2 мм), прожилками и гнездами кальцита и кварц-кальцита.

Минеральные сростки в пробе представлены браунитом с кальцитом, браунитом с кварцем и гематитом. Выявлены отдельные зерна магнетита в сростках с браунитом и родохрозитом. Рудовмещающие породы — доломиты, мраморизованные известняки, сланцы и песчаники. Жильные и прожилковые обособления представлены кальцитом и кварцем. В составе исходной руды обнаружено 5 знаков золота размером 0.05 – 0.07 мм, форма их уплощенная, изометричная и удлиненно-призматическая.

Основной минерал — источник марганца в исследуемой руде — браунит, содержится в виде вкрапленности тонкозернистых плотных масс 0.01 – 0.05 мм, гнездовидных обособлений и редких бипирамидальных кристаллов размером 0.1 – 1 мм (рис. 2). Кристаллы обычно являются включениями в гематитовых джеспилитах. Тонкозернистые массы образуют субпараллельные прослои в гематитовых, реже — магнетит-гематитовых джеспилитах. Браунит нередко содержит примеси гематита, магнетита, кальцита. Зернистые массы и кристаллы имеют черный до серого и буровато-черный цвет, твердость — 5 – 6. Родохрозит установлен в незначительном количестве. Пирохроит встречается крайне редко в виде пленок на родохрозите.

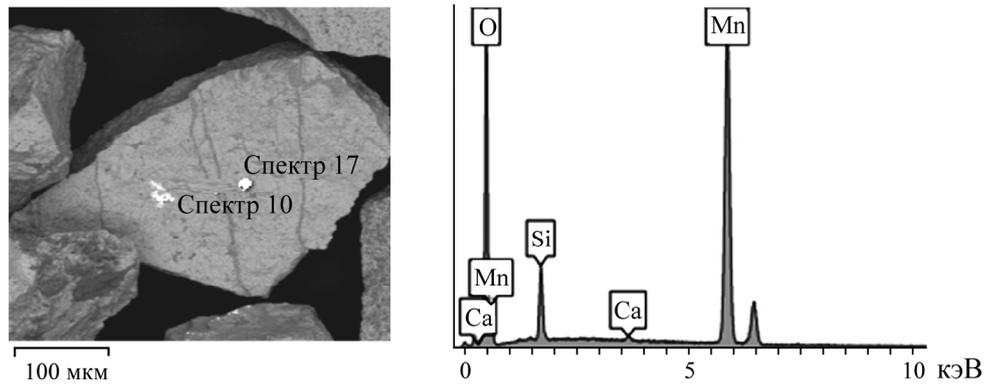


Рис. 2. Бипирамидальный кристалл браунита, выделенный из концентрата (спектр 17: $Mn_{68}Ca_{0.3}Si_{4.7}O_{27}$)

Рентгеноструктурным анализом в руде выявлены две модификации браунита — $CaMn_{14}SiO_{24}$ и $(MnFeCa)_7(SiFe)O_{12}$ [17, 18], а также марганцевые и марганецсодержащие минералы: тефроит — Mn_2SiO_4 , биксбит — $(Mn, Fe)MnO_3$, асболан — $(Co, Ni)_2OMnO_2 \cdot nH_2O$, неотокит — $(Mn, Mg, Fe)_2O_3SiO_3 \cdot H_2O$, фриделит — $(Mn, Fe)_8O_3Si_6O_{15}(OHCl)$ и гидрогаллуазит — $Al_4[Si_4O_{10}][OH] \cdot 4H_2O$.

Минералы железа в руде: гематит — мелкочешуйчатый, красновато-коричневый (иногда черный) и магнетит — тонкозернистый, реже мелкокристаллический. Гематит и магнетит входят в состав магнетит-гематитовых и гематитовых джеспилитов, которые также содержат включения мелкокристаллического браунита либо его тонкозернистые послойные обособления. Основная масса железа представлена гематитом — 7–8%, на магнетит приходится 2–2.5%. Результаты количественного минералогического анализа гематит-браунитовой руды приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Результаты количественного минералогического анализа руды

Минерал и горная порода	Класс крупности, мм						Итого
	-2 + 1	-1 + 0.5	-0.5 + 0.2	-0.2 + 0.1	-1 + 0.071	-0.071	
Золото						5 знаков	5 знаков
Браунит	0.44	1.20	0.14	0.23	—	0.01	2.02
Браунит с примесью гематита	2.32	0.17	—	—	—	—	2.49
Браунит с примесью магнетита	—	0.6	0.69	0.75	0.31	0.04	2.44
Браунит + кальцит	—	—	2.70	1.79	0.09	0.08	4.66
Родохрозит-карбонатные брекчии	—	1.89	—	0.26	—	—	2.15
Гематитовый джеспилит и яшма	6.0	10.82	3.39	0.19	0.83	11.08	32.31
Гематитовый джеспилит с включениями браунита и магнетита	4.21	1.19	1.67	9.94	1.40	0.12	18.53
Гематитовый джеспилит с гнездами и прожилками кальцита	1.71	1.23	2.31	1.16	1.17	0.52	8.10
Магнетит-гематитовый джеспилит	1.42	2.14	5.58	2.07	0.28	0.21	11.70
Магнетитовый джеспилит с включениями кристаллов магнетита, гнездами и прожилками кальцита	0.17	0.03	1.60	—	0.16	0.13	2.09
Кварц + браунит + гематит, лимонит	—	0.06	—	0.04	—	0.27	0.37
Карбонаты (доломит, магнезит)	—	1.65	0.20	1.40	0.25	1.72	5.22
Кальцит, кварц-кальцитовые прожилки и гнездовидные обособления	0.67	—	0.23	0.05	0.28	1.65	2.88
Мраморизованные известняки с примесью гематита; сланцы, песчаники	1.81	0.17	2.91	0.15	—	—	5.04
Итого	18.75	21.20	21.42	18.03	4.77	15.83	100.00

Технологические свойства исследуемой гематит-браунитовой руды обусловлены выявленными особенностями вещественного состава. Браунит представлен послойными обособлениями тонкозернистых масс, тонкой вкрапленностью в гематитовых и магнетит-гематитовых джеспилитах, образует тесные взаимные срастания с гематитом и магнетитом.

Браунит и гематит по магнитной восприимчивости слабомагнитны, для их концентрации необходимо применение высокоинтенсивного магнитного поля, магнетит-гематитовые джеспилиты, содержащие тончайшие рассеянные зерна и кристаллы магнетита, могут также переходить в магнитную фракцию. Разница в плотностях рудных минералов (браунит, гематит, магнетит, свободное золото) и минералов вмещающих пород (кварц, кальцит, доломит) позволяет применять операции гравитационного обогащения исходя из структуры руды, в концентрат могут переходить агрегаты рудных минералов.

Микро- и тонкополосчатая слоистая текстура руды при неравномерном чередовании вмещающих пород и рудных прослоев предусматривает использование многостадийной технологической схемы с перечистками промпродуктов. Слабые магнитные свойства браунита и гематита предопределяют необходимость применения высокоинтенсивного магнитного поля для их извлечения. Наличие свободного золота предполагает возможность его концентрации и выделения с помощью гравитационных методов.

На основании данных вещественного состава проведены поисковые исследования по магнитной сепарации руды мокрым и сухим способами и гравитационному обогащению. Экспериментами по мокрой магнитной сепарации руды крупностью $-2+0$ мм (магнитная индукция $B = 300-330$ мТл) показана возможность выделения магнитного продукта с содержанием марганца 39.65 и железа 7.45 %. По данным минералогического анализа, магнитная фракция представлена скрытозернистым магнетитовым джеспилитом с редкими зернами магнетита; магнетит-гематитовым джеспилитом с включениями и вкрапленностью браунита 90 %; гематитовым джеспилитом с включениями браунита и магнетита 8 %; кварц-карбонат-магнетит-гематитовой брекчией с включениями кристаллов магнетита 2 %.

Эксперименты по сухой магнитной сепарации продемонстрировали возможность получения отвальных по марганцу хвостов и исключения их из технологического цикла для повышения степени извлечения марганца. В данном случае отработан обратный метод магнитного обогащения [19] узкоклассифицированного материала. Магнитная сепарация с шестью перечистками промпродуктов проводилась при силе тока $I = 0.5-1.5$ А, соответствующей $B = 350-750$ мТл, при постепенном выведении из обработки отвальных хвостов с содержанием 2.91–3.42 % Mn и получении концентратов с содержанием марганца 41–43 %. Конечный промпродукт содержал 11.85 % марганца при $\gamma = 2.8$ % (табл. 2).

Предварительные исследования по гравитационному обогащению измельченной руды крупностью -0.071 мм позволили выявить концентрацию марганца 37–39.27 % и выделить в головках и концентратах свободное золото. Результаты поисковых исследований показали возможность разработки комбинированной схемы обогащения гематит-браунитовой руды, включающей дробление руды до 2 мм, операции мокрой и сухой магнитной сепарации, измельчение, гравитационное обогащение (рис. 3).

ТАБЛИЦА 2. Результаты эксперимента по сухой магнитной сепарации руды крупностью $-0.5 + 0.2$ мм, %

Продукт	Выход γ	Содержание β			Извлечение ϵ , MnO (Mn)
		MnO	Mn	Fe _{общ}	
Поступило: $-0.5 + 0.2$ мм	48.71	17.45	13.53	6.10	30.82
1, 2-я сухая магнитная сепарация ($\gamma = 48.71\%$, $I = 1.5$ А, $B = 750$ мТл)					
Хвосты 1	14.73	2.99	2.32	2.91	1.60
Промпродукт 1 (магнитная фракция)	33.98	23.72	18.39	7.35	29.22
Перечистка промпродукта 1 ($\gamma = 33.98\%$, $I = 1.5$ А, $B = 750$ мТл)					
Хвосты 2	5.76	3.28	2.54	3.27	0.68
Промпродукт 2 (магнитная фракция)	28.22	27.90	21.62	7.02	28.54
Перечистка промпродукта 2 ($\gamma = 28.22\%$, $I = 0.5$ А, $B = 300$ мТл)					
Хвосты 3	1.84	3.77	2.79	3.21	0.24
Промпродукт 3 (магнитная фракция)	22.72	25.49	19.76	7.18	20.99
Концентрат Mn 1	3.66	55.06	42.68	6.41	7.31
Перечистка промпродукта 3 ($\gamma = 22.72\%$, $I = 0.5$ А, $B = 300$ мТл)					
Концентрат Mn 2	1.69	55.53	43.05	5.16	3.40
Промпродукт 4 (магнитная фракция)	21.03	23.07	17.88	8.56	17.59
Перечистка промпродукта 4 ($\gamma = 21.03\%$, $I = 0.5$ А, $B = 300$ мТл)					
Концентрат Mn 3	2.29	54.17	41.99	5.16	4.50
Промпродукт 5 (магнитная фракция)	13.67	24.96	19.35	7.15	12.37
Хвосты 4	5.07	3.92	3.04	3.42	0.72
Перечистка промпродукта 5 ($\gamma = 13.67\%$, $I = 0.5$ А, $B = 300$ мТл)					
Концентрат Mn 4	2.88	53.78	41.69	5.22	5.62
Промпродукт 6 (магнитная фракция)	10.79	17.25	13.37	6.69	6.75
Перечистка промпродукта 6 ($\gamma = 10.79\%$, $I = 0.5$ А, $B = 300$ мТл)					
Концентрат Mn 5	2.27	53.81	41.71	5.29	4.43
Промпродукт 7	2.80	15.29	11.85	5.92	1.55
Хвосты 5	5.72	3.70	2.87	3.29	0.77
Конечные продукты обогащения по классу $-0.5 + 0.2$ мм					
Концентрат Mn 1	3.66	55.06	42.68	6.41	7.31
Концентрат Mn 2	1.69	54.37	42.15	5.16	3.40
Концентрат Mn 3	2.29	54.17	41.99	5.16	4.50
Концентрат Mn 4	2.88	53.78	41.69	5.22	5.62
Концентрат Mn 5	2.27	53.81	41.71	5.29	4.43
Всего концентрат Mn	12.79	54.27	42.07	—	25.26
Промпродукт	2.80	15.29	11.85	—	1.55
Хвосты 1	14.73	2.99	2.32	2.91	1.60
Хвосты 2	5.76	3.28	2.54	3.27	0.68
Хвосты 3	1.84	3.77	2.92	3.21	0.24
Хвосты 4	5.07	4.35	3.37	3.42	0.72
Хвосты 5	5.72	3.78	2.93	3.29	0.77
Всего хвосты отвальные	33.12	3.42	2.65	—	4.01
Итого $-0.5 + 0.2$ мм	48.71	17.45	13.53	6.10	30.82

0.75 и 0.71 % соответственно. Промпродукт стола с содержанием 16.96 % Mn и 8.35 % Fe складировался для последующей гидрометаллургической переработки. Таким образом, в результате двухстадийной мокрой магнитной сепарации с перечисткой магнитного продукта в отдельном цикле и концентрации на столе выделены концентраты с содержанием 37.05–48.59 % при извлечении 24.4 % (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Результаты мокрой магнитной сепарации гематит-браунитовой руды, %

Продукт	Выход γ	Содержание β			Извлечение ϵ , Mn
		MnO	Mn	Fe	
	100.00	27.58	21.38	6.66	100.00
1-я мокрая магнитная сепарация ($B = 200$ мТл)					
Магнитная фракция	14.55	50.33	39.02	8.02	26.55
Немагнитная фракция	85.45	23.71	18.38	6.43	73.45
Итого	100.00	27.58	21.38	6.66	100.00
1-я перечистка магнитной фракции					
Концентрат Mn 1	9.01	57.15	44.30	7.45	18.67
Промпродукт	5.54	39.23	30.41	6.41	7.88
Измельчение (-0.5 мм) – 2-я магнитная сепарация					
Концентрат Mn 2	2.09	56.30	43.64	4.54	4.27
Промпродукт	3.45	28.86	22.37	7.54	3.61
Концентрация на столе					
Концентрат Mn 3	0.33	62.68	48.59	4.0	0.75
Концентрат Mn 4	0.41	47.80	37.05	5.02	0.71
Хвосты стола (промпродукт)	2.71	21.88	16.96	8.35	2.15
Магнитная фракция:					
концентраты 1 – 3	11.43	57.16	44.31	6.82	23.69
концентрат 4	0.41	47.80	37.05	5.02	0.71
промпродукт 1	2.71	21.88	16.96	8.35	2.15
Итого магнитная фракция	14.55	50.33	39.02	8.02	26.55

Немагнитная фракция с содержанием 18.38 % Mn направлялась на дальнейшее обогащение гравитационными методами с целью извлечения минералов марганца и попутной концентрации благородных металлов. Гравитационное разделение немагнитного продукта осуществлялось по схеме: отсадка – основная и контрольная центробежная сепарация – классификация – концентрация на столе подрешетного продукта отсадки, черновых концентратов сепаратора Кп. При переработке продуктов на концентрационном столе предусматривалось, наряду с концентратами, выделение “головок”. Реализацией цикла “отсадка – 1-я центробежная сепарация – концентрация на столе” получены концентраты с содержанием марганца 37.0 и 38.7 % при общем извлечении 5.48 %. После доизмельчения хвостов Кп (крупность 85.19 % класса -0.5 мм) во 2 цикле (сепарация – стол) выделен концентрат с содержанием 41.23 % Mn и извлечением 9.41 %.

Таким образом, по гравитационной схеме обогащения получено три концентрата с содержанием 37.0, 38.7 и 41.23 % марганца при общем извлечении 14.93 %, а также промпродукт с содержанием 29.19 % Mn и хвосты 13.04 %. Результаты гравитационного обогащения немагнитной фракции приведены в табл. 4. Согласно данным минералогического анализа, хвосты гравитационного обогащения представлены сростками браунита с кальцитом, кварцем, гематитом, гематитовыми джеспилитами с включениями кристаллов и тонких прослоев браунита; содержат кальцит, яшмы, мраморизованные известняки, микробрекчии.

ТАБЛИЦА 4. Результаты гравитационного обогащения немагнитной фракции руды, %

Продукт	Выход γ	Содержание β			Извлечение ϵ , Mn
		MnO	Mn	Fe _{общ}	
Немагнитная фракция	85.45	23.71	18.38	6.43	73.45
Отсадка					
Надрешетный продукт	46.40	26.21	20.32	6.39	44.10
Подрешетный продукт	14.43	23.41	18.15	7.10	12.25
Хвосты отсадки	24.62	19.17	14.86	6.11	17.10
Итого отсадка	85.45	23.71	18.38	6.43	73.45
Концентрация на столе подрешетного продукта					
Концентрат стола 1	1.35	47.74	37.00	6.47	2.33
в том числе головка стола	0.11	Au 37.17 г/т			—
Хвосты стола	13.08	20.87	16.18	7.17	9.92
Итого подрешетного продукта	14.43	23.41	18.15	7.10	12.25
1-я центробежная сепарация надрешетного продукта, хвостов отсадки и стола					
Основной + контрольный концентрат Кп	4.82	42.11	32.65	6.84	7.36
Хвосты Кп 1	79.28	22.18	17.19	6.39	63.76
Итого центробежная сепарация	84.10	23.32	18.08	6.42	71.12
Перечистка черного концентрата Кп на концентрационном столе					
Концентрат стола 2	1.74	49.92	38.70	6.77	3.15
в том числе головка стола	0.02	Au 12.76 г/т			—
Промпродукт 2	3.08	37.69	29.22	6.88	4.21
Итого концентрат Кп	4.82	42.11	32.65	6.84	7.36
Измельчение хвостов Кп 1 – центробежная сепарация – концентрация на столе					
Концентрат стола 3	4.89	53.22	41.23	6.54	9.43
в том числе головка стола	0.37	Au 15.46 г/т			—
Промпродукт 3	11.86	37.64	29.18	6.79	16.19
Хвосты Кп 2	62.53	16.82	13.04	6.31	38.14
Итого хвосты Кп 1	79.28	22.18	17.19	6.39	63.76
Конечные продукты гравитационного обогащения					
Концентрат 1 отсадка – стол	1.35	47.74	37.00	6.47	2.33
Концентрат 2 Кп – стол	1.74	49.92	38.70	6.77	3.15
Концентрат 3 измельченный – стол	4.89	53.22	41.23	6.54	9.43
Всего гравитационный концентрат	7.98	51.60	40.00	6.52	14.91
в том числе головка стола	0.50	Au 12.76 – 37.17 г/т			—
Промпродукт 1	3.08	37.69	29.22	6.88	4.21
Промпродукт 2	11.86	37.64	29.18	6.79	16.19
Всего промпродукт	14.94	37.66	29.19	6.86	20.40
Хвосты	62.53	16.82	13.04	6.31	38.14
Немагнитная фракция	85.45	23.71	18.38	6.43	73.45

Очевидно, что улучшение технологических показателей может осуществляться путем увеличения глубины обогащения хвостов и промпродуктов. Гранулометрический состав и распределение марганца в гравитационных хвостах свидетельствуют об основной концентрации марганца в классах $-0.5+0.02$ мм, хотя несколько обогащен и крупный класс $-1+0.5$ мм. Седиментационный анализ показал, что на долю шламов (-0.02 мм) приходится 5.7% материала с содержанием марганца 9.3% (табл. 5). Труднообогащаемые шламы складировались для дальнейшей переработки.

ТАБЛИЦА 5. Содержание и распределение марганца в хвостах гравитационного обогащения руды, %

Класс крупности, мм	Выход		Содержание		Извлечение	
	от исходного	от операционного	MnO	Mn	от исходного	от операционного
Исходные хвосты	62.53	100.00	16.82	13.04	38.14	100.00
Классификация, обесшламливание						
-1 + 0.5	9.26	14.81	22.54	17.48	7.57	19.85
-0.5 + 0.2	30.46	48.71	17.45	13.53	19.28	50.55
-0.2 + 0.02	17.11	27.36	14.20	11.01	8.81	23.10
-0.02	5.70	9.12	11.99	9.30	2.48	6.50
Итого хвосты	62.53	100.00	16.82	13.04	38.14	100.00

В результате сухой магнитной сепарации ($B = 300 - 750$ мТл) из хвостов гравитационного обогащения, дифференцированных по крупности, получены марганцевые концентраты с содержанием 47.10, 42.07, 39.58 %. Общее извлечение марганца в концентраты составило 66.76 %, при этом 41.27 % Mn извлечено из фракции $-0.5 + 0.2$ мм. Данные минералогического и рентгеноструктурного анализов хорошо согласуются: в составе концентратов выявлены минералы марганца — браунит и тефроит, а также присутствие фаз гематита и кварца (рис. 4).

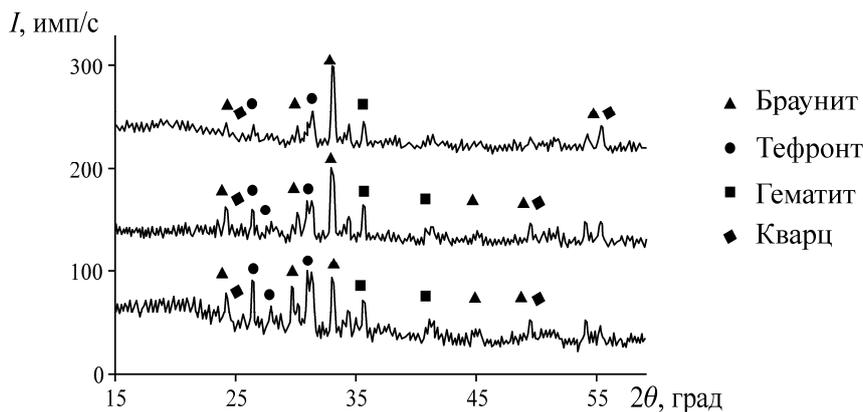


Рис. 4. Рентгенограммы концентратов гематит-браунитовой руды

В процессе магнитной сепарации с 14 перечистками из фракции руды $-1 + 0.5$ мм, выход которой составил 9.26 %, в отвальные хвосты выведено 5.52 % материала со средним содержанием 2.67 % Mn; из фракции $-0.5 + 0.2$ мм (с 10 перечистками) при выходе 30.46 % в хвосты удалено 20.71 % материала с содержанием 2.65 % Mn; из класса $-0.2 + 0.02$ мм (с 11 перечистками) выведено 7.37 % нерудной части с содержанием 2.93 % Mn. Общий выход отвальных хвостов равнялся 33.6 % (что составляет более половины переработанных гравитационных хвостов — 53.73 %) при содержании 2.72 % Mn (табл. 6). Промпродукты, полученные в цикле гравитационного обогащения, также подвергались сухой магнитной сепарации в сильном поле. Схема обогащения промпродуктов включала следующие операции: грохочение, измельчение (85.19 % класса -0.5 мм), классификацию, магнитную сепарацию, 12 перечисток промпродуктов с последовательным выделением марганцевых концентратов. В результате магнитного обогащения ($I = 1.5 - 2$ А, соответственно $B = 750 - 850$ мТл) получено 5 концентратов с содержанием марганца 49.74, 47.89, 45.14, 44.02, 42.81 % ($\beta_{\text{сум}} = 46.05$ %) при общем извлечении 9.8 % и промпродукт, содержащий 28.13 % Mn.

ТАБЛИЦА 6. Результаты сухой магнитной сепарации хвостов гравитационного обогащения, %

Продукт	Выход γ		Содержание β		Извлечение ϵ , Мп	
	от исходного	от операционного	MnO	Mn	от исходного	от операционного
Хвосты гравитационные	62.53	100.00	16.82	13.04	38.14	100.00
Сухая магнитная сепарация						
– 1 + 0.5 мм ($B = 300 - 750$ мТл)						
Концентрат Мп	2.86	4.57	60.76	47.10	6.30	16.52
Промпродукт	0.88	1.41	19.09	14.18	0.58	1.52
Всего хвосты	5.52	8.83	3.44	2.67	0.69	1.81
Итого	9.26	14.81	22.55	17.48	7.57	19.85
– 0.5 + 0.2 мм ($B = 300 - 750$ мТл)						
Концентрат Мп	8.00	12.79	54.27	42.07	15.74	41.27
Промпродукт	1.75	2.80	15.29	11.85	0.97	2.54
Всего хвосты	20.71	33.12	3.42	2.65	2.57	6.74
Итого	30.46	48.71	17.45	13.53	19.28	50.55
– 0.2 + 0.02 мм ($B = 300 - 750$ мТл)						
Концентрат Мп	1.85	2.96	51.06	39.58	3.42	8.97
Промпродукт	7.89	12.62	15.23	11.81	4.38	11.48
Хвосты	7.37	11.78	3.78	2.93	1.01	2.65
Итого	17.11	27.36	14.20	11.01	8.81	23.10
Конечные продукты						
Концентрат Мп общий	12.71	20.33	55.25	42.83	25.46	66.76
Промпродукт	10.52	16.82	15.54	12.05	5.93	15.54
Хвосты	33.60	53.73	3.50	2.72	4.27	11.20
Шламы – 0.02 мм	5.70	9.12	11.99	9.30	2.48	6.50
Исходные хвосты	62.53	100.00	16.82	13.04	38.14	100.00

В результате реализации предложенной комбинированной магнитно-гравитационно-магнитной схемы (рис. 3) показана возможность получения марганцевых концентратов: мокрой магнитной сепарации — 44.31 и 37.05 % при извлечении 24.4 %; гравитационного разделения — 37.0, 38.7, 41.26 % при извлечении 14.91 %; сухой магнитной сепарации — 47.10, 42.07, 39.58 % при извлечении 25.46 %; перечистки промпродуктов гравитационного обогащения — 46.05 % при извлечении 9.80 %. Полученные концентраты можно объединить по качеству в 4 группы (рис. 5).

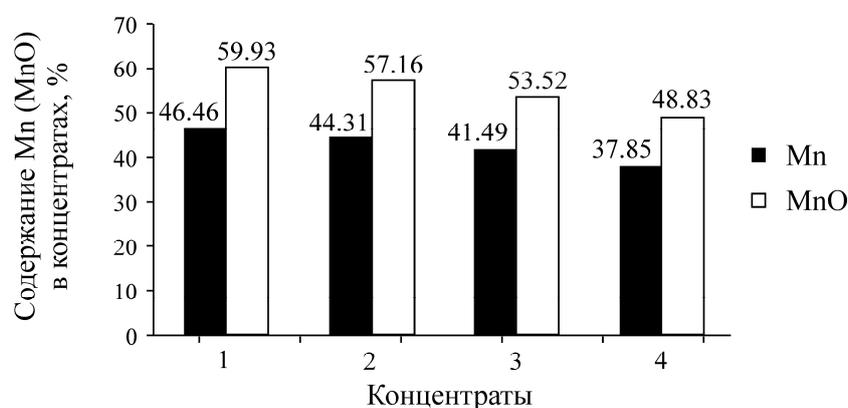


Рис. 5. Содержание марганца и оксида марганца в концентратах

Общий выход концентратов по схеме составил 37.08 %, общее извлечение — 74.57 %. Содержание марганца в хвостах — 2.66 %, что позволяет отнести их к отвальным. Потери с хвостами — 4.27 %, со шламами — 2.48 %. Промпродукты с содержанием 12.05, 16.96, 21.81 % будут подвергаться дальнейшей переработке гидрометаллургическими методами. Сводные показатели всего комплекса исследований по комбинированной схеме приведены в табл. 7.

ТАБЛИЦА 7. Сводные показатели комплекса исследований по комбинированной схеме

Наименование продукта	Выход γ	Содержание β MnO (Mn)			Извлечение ϵ , MnO (Mn)
Мокрая магнитная сепарация					
Концентрат Мп	11.43	57.16	44.31	6.82	23.69
Концентрат Мп	0.41	47.80	37.05	5.02	0.71
Всего концентрат	11.84	—			24.40
Промпродукт	2.71	21.88	16.96	8.35	2.15
Отсадка – центробежная сепарация Кп – концентрация на столе					
Концентрат Мп отсадка – стол	1.35	47.74	37.00	6.47	2.33
Концентрат Мп Кп – стол	1.74	49.92	38.70	6.77	3.15
Концентрат измельченный – Кп – стол	4.89	53.22	41.23	6.54	9.43
Всего гравитационный концентрат в том числе головка стола	7.98 0.5	Au 12.76 – 37.17 г/т		6.52	14.91
Промпродукт	14.94	37.66	29.19	6.53	20.40
Хвосты	62.53	16.82	13.04	6.45	38.14
Сухая магнитная сепарация					
Концентрат – 1 + 0.5 мм	2.86	60.76	47.10	3.81	6.30
Концентрат – 0.5 + 0.2 мм	8.00	54.27	42.07	5.55	15.74
Концентрат – 0.2 + 0.02 мм	1.85	51.06	39.58	8.01	3.42
Итого концентрат	12.71	—			25.46
Промпродукт	10.52	15.54	12.05	8.97	5.93
Хвосты	33.60	3.50	2.72	4.27	4.27
Шламы – 0.02 мм	5.70	11.99	9.30	6.11	2.48
Измельчение – перемешивание промпродукта					
Концентрат промпродукта	4.55	59.40	46.05	7.20	9.80
Промпродукт	10.39	28.13	21.81	6.71	10.60
Итого продукты: концентрат	37.08	52.89	43.00	7.92	74.57
промпродукт мокрой магнитной сепарации	2.71	21.88	16.96	8.35	2.15
промпродукт сухой магнитной сепарации	10.52	15.54	12.05	8.97	5.93
Промпродукт перемешивания промпродукта	10.39	28.13	21.81	6.71	10.60
Шламы	5.70	12.00	9.30	6.11	2.48
Хвосты отвальные	33.60	3.43	2.66	4.31	4.27
Итого гематит-браунитовая руда	100.00	27.58	21.38 Au 0.49 г/т	6.66	100.00

В процессе исследований выявлена благороднометалльная минерализация руды, представленная свободным золотом и тонкими включениями золота, платины и серебра в гематитовых и магнетит-гематитовых джеспилитах. Свободное золото выделено в “золотых головках” и концентратах при перемешивании на столе подрешетных продуктов отсадки (во фракциях крупностью – 0.5 + 0.2 и – 0.2 + 0.0 мм) и концентратов центробежной сепарации после измельчения

(в классе крупности $-0.2+0.0$ мм). Золото имеет вид преимущественно уплощенных зерен размером $0.01-0.5$ мм. Форма золотин изометричная и сферическая, округлая, эллипсоидная, реже призматическая; края зерен сглаженные, иногда слегка загнутые, поверхность волнисто-ямчатая, вмятины часто заполнены рудными скоплениями, характерны пленки гидроокислов железа и марганца, карбонатные налеты (рис. 6).

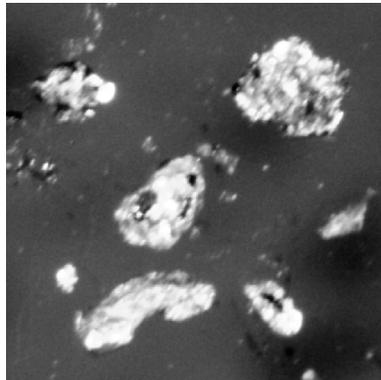


Рис. 6. Золото, выделенное из концентрата стола

Электронно-микроскопическими исследованиями золото в виде тонких включений (иногда с примесью платины и серебра) обнаружено в брауните и магнетит-гематитовом джеспилите (рис. 7–9).

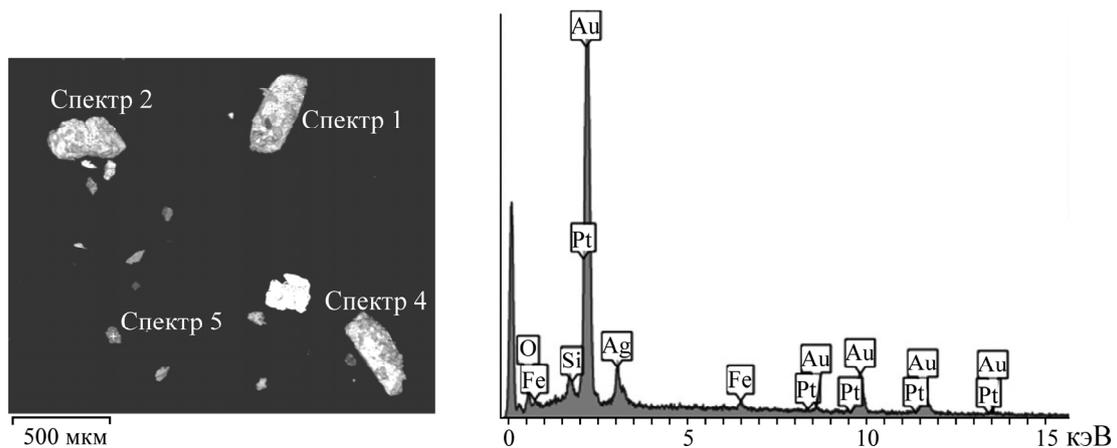


Рис. 7. Свободное золото с примесью платины и серебра (спектр 3: $Au_{72.5}Pt_{4.4}Ag_{12.5}Fe_{1.8}Si_{0.5}O_{8.3}$)

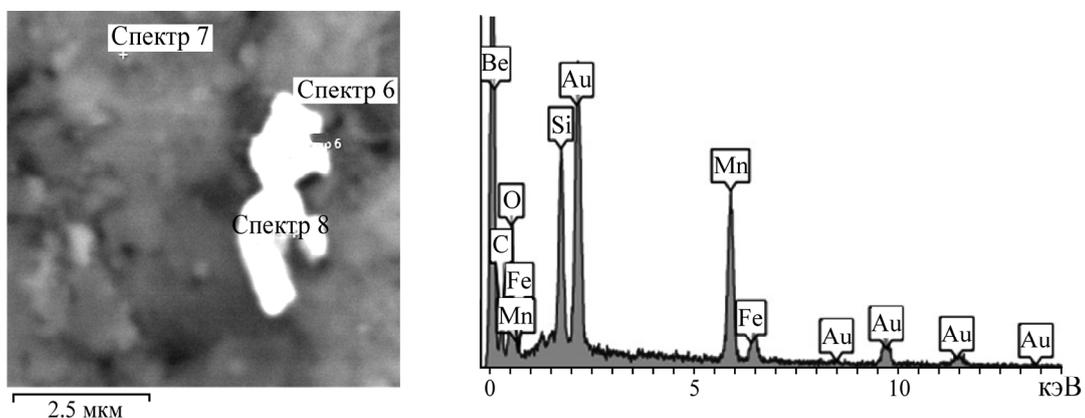


Рис. 8. Включение золота в брауните, выделенном из концентрата (спектр 6: $Au_{38.7}Mn_{26.7}Fe_{1.8}Si_{9.3}O_{23.5}$)

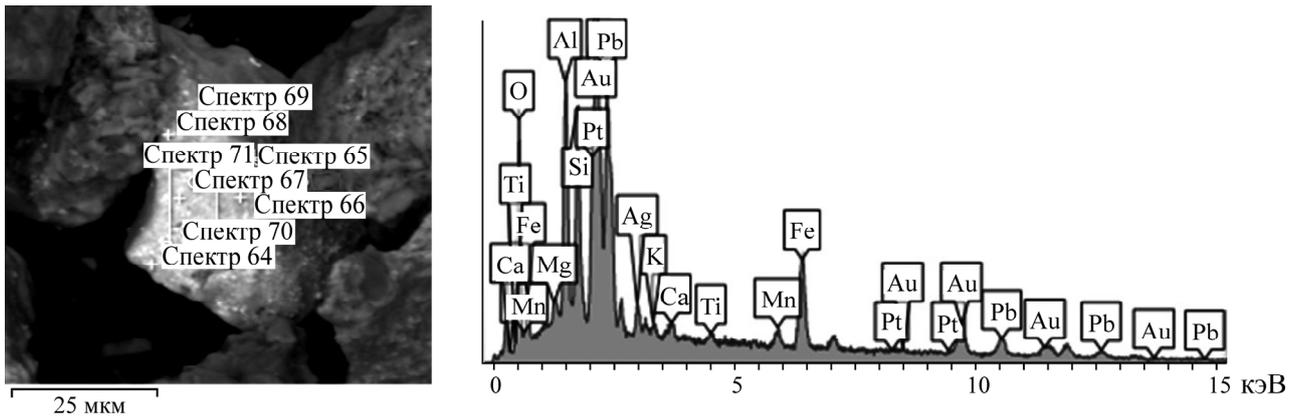


Рис. 9. Золото с примесью платины и серебра (спектр 65: $Au_{18}Pt_{10}Ag_3Fe_9Mn_2Pb_{24}TiCaKMgAl_5Si_5O_{20}$)

Результаты петрографического, количественного минералогического и электронно-микроскопического анализов объединенных продуктов обогащения представлены в табл. 8.

ТАБЛИЦА 8. Петрографический и минеральный состав продуктов обогащения

Продукт обогащения	Петрографический и минеральный состав	Содержание, %	Электронно-микроскопический спектр
Магнитная сепарация			
Магнитная фракция	Браунит	8	$Mn_{61}O_{28}Fe_{3.9}Cu_{0.1}Si_7$
	Магнетит-гематитовый джеспилит	80	
	Магнетитовый джеспилит	10	
	Кварц – магнетит – гематитовая брекчия	2	
Отсадка – концентрация на столе			
Концентраты –2 + 1, –1 + 0.5, –0.5 + 0.2, –0.2	Браунит	40 – 47	$Mn_{66.35}Fe_{1.29}Ca_{1.03}Si_{4.93}Al_{0.4}O_{26}$ $Au_{93}C_7$; $Au_{75.71}Ag_{14.15}O_{1.14}C_9$
	Золото	21 знак	
	Гематитовый джеспилит	45	
	Магнетит-гематитовый джеспилит	8 – 15	
Хвосты стола и отсадки	Браунит	14	$Mn_{64.43}Ca_{0.69}Si_{11.02}Al_{1.44}O_{28.2}$
	Гематитовый джеспилит	45	
	Магнетитовый джеспилит	6	
	Карбонаты, кварц, микробрекчии	35	
Центробежная сепарация Кп – концентрация на столе			
Концентраты –1 + 0.5, –0.5 + 0.2, –0.2	Браунит	40 – 52	$Mn_{68.06}Ca_{0.30}Si_{4.72}O_{26.04}$
	Золото	5 знаков	
	Магнетит-гематитовый джеспилит	45 – 57	
	Карбонаты	3	
Хвосты стола и центробежной сепарации	Браунит	12	—
	Гематитовый джеспилит	48	
	Карбонат; кварц; яшмы; микробрекчии	40 – 42	
Доизмельчение – центробежная сепарация – концентрация на столе			
Концентраты –0.5 + 0.2, –0.2	Браунит	55 – 60	$Mn_{74.0}Si_{6.3}Fe_{4.3}Mg_{1.1}Ca_{0.9}$ $Au_{80}Ag_2Mn_2Fe_2CaSiO_{12}$ $Au_{72.5}Pt_{4.4}Ag_{12.5}Fe_{1.8}Si_{0.5}O_{8.3}$
	Золото, в том числе с примесью платины	27 знаков	
	Магнетит-гематитовый джеспилит	35 – 40	
Промпродукты	Браунит	26 – 30	$Mn_{66}Fe_3Ti_{0.1}Ca_{0.6}K_{0.3}AlMgSi_3O_{25}$
	Гематитовый джеспилит	67 – 71	
	Магнетитовый джеспилит	3	
Хвосты стола	Браунит	8 – 10	$Mn_{57.8}Si_{22.8}Fe_{11.6}F_{5.4}O_{2.4}$
	Гематитовый джеспилит	60	
	Кальцит, яшмы, мраморизованные известняки, микробрекчии	30 – 32	

ВЫВОДЫ

Труднообогатимые железомарганцевые руды гематит-браунитового типа месторождения Поперечного характеризуются сложной текстурой и структурой; тонкозернистыми послонными обособлениями браунита, его тонкой вкрапленностью и включениями в джеспилитах, тесными сростаниями и взаимными прорастаниями с минералами железа и вмещающих пород; присутствием минералов, близких с браунитом по плотности и магнитной восприимчивости.

Показано, что разработанная комбинированная многостадийная схема переработки гематит-браунитовой руды, включающая операции мокрой и сухой магнитной сепарации в слабом и сильном поле и гравитационного обогащения, обеспечивает возможность получения марганцевых концентратов с содержанием 37.85–46.46 % Mn.

Использование метода обратной магнитной сепарации гематит-браунитовой руды предусматривает возможность стадийного вывода отвальных хвостов со средним содержанием 2.66 % Mn из технологического цикла; промпродукты подлежат дальнейшей гидрометаллургической переработке.

Установлена благороднометалльная минерализация, представленная свободным золотом и его тонкими включениями, содержащими примеси платины и серебра в гематитовых и магнетит-гематитовых джеспилитах. Содержание золота в исходной руде составило 0.49 г/т, по гравитационной схеме, ориентированной на концентрацию свободного золота, выделены “головки” с содержанием 12.76–37.17 г/т Au.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **О состоянии** и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2013 г. / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Государственный доклад. — М.: Минерал-Инфо, 2014. — С. 137–142.
2. **Тигунов Л. П., Ожогина Е. Г., Литвинцев Э. Г., Броницкая Е. С., Ануфриева С. И., Калиш Е. А.** Современные технологии обогащения и гидрометаллургического передела марганцевых руд // Горн. журн. — 2007. — № 2. — С. 78–84.
3. **Башлыкова Т. В., Пахомова Г. А., Лагов Б. С., Живаева А. Б., Дорошенко М. В., Макавецкас А. Р., Шульга Т. О.** Технологические аспекты рационального недропользования. — М.: МИСиС, 2005. — С. 241–249.
4. **Гурман М. А., Щербак Л. И.** Поисковые исследования по выявлению благороднометалльной минерализации в железомарганцевых рудах // X Конгресс обогатителей стран СНГ, 17-19 февраля 2015: сб. материалов. Т. II. — М.: МИСиС, 2015. — С. 572–573.
5. **Гурман М. А., Щербак Л. И., Вылегжанина Е. В., Богомяков Р. В.** Поисковые исследования руды гематит-браунитового типа (уч. Поперечный) // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения-2015): материалы Международ. совещ., посвященного памяти чл.-корр. РАН С. Б. Леонова. — Иркутск: РИЭЛ, 2015. — С. 170–172.
6. **Архипов Г. И.** Перспективы развития черной металлургии на Дальнем Востоке // Маркшейдерия и недропользование. — 2010. — № 4. — С. 12–18.
7. **Моисеенко Н. В., Щипачев С. В., СанILEвич 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.

8. 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.
9. Жирнов А. М., Горошко М. В., Моисеенко Н. В. Южно-Хинганский золото-железородный гигант в протерозойском грабене Буреинского кратона (Дальний Восток России) // Вестн. Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. — 2012. — № 2. — С. 2–10.
10. Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г. Геомеханическая оценка условий разработки Южно-Хинганского месторождения марганцевых руд // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 13–23.
11. 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. — С. 111–115.
12. Невструев В. Г., Бердников Н. В., Саксин Б. Г., Усиков В. И. Благороднометалльная минерализация в углеродистых породах Поперечного железомарганцевого месторождения (Малый Хинган, Россия) // Тихоокеан. геология. — 2015. — Т. 34. — № 6. — С. 102–111.
13. Malayoglu U. Study on the gravity processing of manganese ores, Asian Journal of Chemistry, 2010, Vol. 22, No. 4. — P. 3292–3298. <http://www.asianjournalofchemistry.co.in>.
14. Grigорова I. Studies and possibilities of low grade manganese ore beneficiation, Proc. of XXII World Mining Congress, Istanbul, Turkey, 2011, Vol. III. — P. 593–598. <https://www.researchgate.net/publication>.
15. Semanová Z. and Legemza J. Analysis and use of Mn ore fines, Acta Metallurgica Slovaca, 2014, Vol. 20, No. 4. — P. 410–417. <http://www.qip-journal.eu>.
16. Dilip Makhija, Mukherjee A. K., and Tamal Kanti Ghosh. Preconcentration feasibility of gravity and magnetic techniques for banded hematite jasper, International Journal of Mining Engineering and Mineral Processing, 2013, Vol. 2, No. 1. — P. 8–15. <http://article.sapub.org>.
17. Gutzmer J. and Beukes N. J. Mineralogy and mineral chemistry of oxide-facies manganese ores of the postmasburg manganese field, South Africa, Mineralogical Magazine, 1997, Vol. 61. — P. 213–231.
18. Johan P. R. De Villiers. The crystal structure of braunite II and its relation to bixbyite and braunite, American Mineralogist, 1980, Vol. 65. — P. 756–765.
19. Гурман М. А., Щербак Л. И., Александрова Т. Н. Исследование обогатимости бедных железных руд // ГИАБ. — 2010. — № 4. — С. 289–297.

Поступила в редакцию 27/III 2017