

УДК 549 : 553.31 : 622.7 (477.63)

Евтехов В.Д., Перегудов В.В., Евтехов Е.В., Дударь Л.Т.,
Филенко В.В., Смирнов А.Я., Биленко А.Е., Николенко Е.М.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ ГЕМАТИТОВЫХ КВАРЦИТОВ ЖЕЛЕЗИСТО-КРЕМНИСТОЙ ФОРМАЦИИ ДОКЕМБРИЯ

Проанализированы результаты изучения обогатимости гематитовых кварцитов железисто-кремнистой формации докембрия как перспективного для государств СНГ сырья по производству высококачественного железорудного концентрата. Дана минералогическая оценка позитивных и негативных результатов ранее выполненных технологических испытаний. С учетом данных минералого-технологических исследований авторов статьи, сформулированы минералогические рекомендации к разработке оптимальных технологий рудоподготовки и обогащения гематитовых кварцитов.

Месторождения Криворожского бассейна, Кременчугского и Белозерского районов, Курской магнитной аномалии и других аналогичных регионов планеты характеризуются большим разнообразием минеральных, генетических, промышленных разновидностей железных руд. В разрезах продуктивных толщ месторождений выделяется несколько видов богатых (более 46 мас.% железа) и бедных (25-46 мас.% железа) магнетитовых, гематитовых и гетитовых (бурожелезняковых) руд [2, 7]. В состав каждого вида руд входят десятки и даже сотни их минеральных разновидностей. Например, в составе продуктивных толщ месторождений магнетитовых кварцитов, относящихся к одному из основных минеральных видов бедных железных руд Кривбасса, выделяются от 80 до более 200 их минеральных разновидностей: собственно магнетитовые, железнослюдко-магнетитовые, магнетит-железнослюдковые, куммингтонит-магнетитовые, биотит-куммингтонит-

магнетитовые, хлорит-сидерит-магнетитовые, рибекит-магнетитовые...

В индустриальную отработку первыми (начиная с в 1881 г.) были вовлечены залежи богатых гетитовых (бурожелезняковых) и гематитовых руд, затем с углублением шахт – богатых магнетитовых руд. Со середины XX в. началась эксплуатация значительно более крупных залежей магнетитовых кварцитов. Залежи богатых магнетитовых и бурожелезняковых руд к настоящему времени практически полностью отработаны; разработка месторождений богатых гематитовых руд и магнетитовых кварцитов продолжается.

Однако в связи с постепенным исчерпанием разведанных запасов руд этих двух видов все более актуальным становится вовлечение в эксплуатацию бедных гематитовых руд – гематитовых кварцитов. Систематические исследования возможности эффективного обогащения гематитовых кварцитов с целью производства высококачественного железору-

дногo концентрата были начаты в конце 50-х и начале 60-х годов XX ст. Обработка технологического оборудования для аппаратурного оформления технологических схем выполнялось в учебных, научно-исследовательских и проектных институтах «Механобр» (Санкт-Петербург), «Механобрчермет» (Кривой Рог), «Гипромашуглеобогащение» (Луганск), «Гаманон» (Кривой Рог), «Продэкология» (Ровно), РИВС (Санкт-Петербург), Криворожский горнорудный институт (в настоящее время Криворожский национальный университет), Днепропетровский горный институт (в настоящее время Национальный горный университет), Криворожский горнообогатительный комбинат окисленных руд (КГОКОР), Институт минеральных ресурсов (в настоящее время Крымский филиал Украинского научно-исследовательского геологоразведочного института), «Магнис» (Луганск), «Прогресс» (Бердичев), «Спирит» (Иркутск), «Аэромех» (Луганск) и др.

В Научно-исследовательском и проектно-институте «Механобр» на протяжении 60-х годов XX ст. под руководством Ю.А.Ашиткова выполнялись исследования обогатимости гематитовых (так называемых «окисленных») кварцитов четвертого железистого горизонта Валявкинского месторождения с применением гравитационных методов [1]. Общее содержание железа ($Fe_{\text{общ.}}$) в исходной пробе составляло 37 мас.%; содержание железа, входящего в состав гематита (главным образом, мартита) ($Fe_{\text{гем.}}$) – 27 мас.%; входящего в состав магнетита ($Fe_{\text{магн.}}$) – 6 мас.%; в состав других минералов – 4 мас.%

По результатам исследований, при гравитационном обогащении гематитовых кварцитов, материал которых был измельчен до крупности $-0,2+0$ мм, может быть получен концентрат с содержанием железа 63-64 мас.%. Выполнялись также технологические эксперименты с использованием флотационной и комбинированной гравитационно-флотационной схем. Было установлено, что извлечение железа в концентрат по комбинированной схеме на 3,5% выше по сравнению со схемой прямой

флотации. Кроме того, комбинированная схема оказалась более экономичной.

На протяжении 1976-86 гг. в Научно-исследовательском и проектно-институте «Механобрчермет» была выполнена серия исследований минерального, химического состава и обогатимости гематитовых кварцитов магнитным и магнитно-флотационным методами. В.М.Малый и другие сотрудники института с целью проверки технологии магнитного обогащения гематитовых кварцитов Валявкинского месторождения провели эксперименты в лабораториях института и полупромышленные испытания на промышленной секции Михайловского ГОКа. Полупромышленные испытания проводились с помощью высокоградIENTных магнитных сепараторов ДР-317 (Германия). На первой стадии обогащения использовался сепаратор с рабочим зазором 2,5 мм и максимальной индукцией магнитного поля в рабочем зазоре 0,86 Тл; на второй стадии – с рабочим зазором 0,8 мм и с максимальной индукцией магнитного поля в рабочем зазоре 1,25 Тл. Содержание железа в составе исходной руды составило 36,7 мас.%, в том числе железа в составе магнетита – 3 мас.%. В процессе полупромышленных испытаний была уточнена составленная по лабораторным данным технологическая схема обогащения исходного сырья. Были получены концентраты с общим содержанием железа от 58,3 до 61,2 мас.%; выход концентрата и извлечение железа в концентрат составили, соответственно, 45,4-37,8% и 72,7-62,8%.

Под руководством И.П.Богдановой в 1986-87 гг. в институте «Механобрчермет» были выполнены испытания обогатимости материала 140 малых технологических проб гематитовых кварцитов Валявкинского месторождения и 8 объединенных проб, скомпонованных из материала малых проб в соответствии с разработанной авторами минералоготехнологической классификацией бедных гематитовых руд (гематитовых кварцитов) месторождения. По данным химического и фазового анализа материала малых технологических проб, были определены границы колебаний общего содержания железа в составе гематитовых кварцитов и распределение железа

между главными рудообразующими минералами (мас.%): $Fe_{\text{общ.}}$ – 14,3-60,3; $Fe_{\text{гем.}}$ – 9,5-56,8; $Fe_{\text{магн.}}$ – 0,1-17,6. Содержание железа в составе гидроксидов ($Fe_{\text{гидр.}}$) колебалось в границах 0,9-18,5 мас.%; в составе карбонатов и силикатов ($Fe_{\text{карб.+сил.}}$) – 0,1-5,7 мас.%.

Авторы пришли к выводу, что гематитовые кварциты очень неоднородны по физическим и техническим показателям. Прочность по шкале М.М.Протодяконова материала 46% малых проб превышала 8 баллов, материала 54% проб была ниже 8.

При обогащении по двухстадийной магнитной схеме с использованием высокоинтенсивного магнитного анализатора ВГМС 10-15-20 фирмы «Сала» при конечной крупности измельченного материала 95% класса -0,045 мм были получены концентраты с общим содержанием железа 44,6-67,7 мас.% при извлечении железа в концентрат 39,6-94,7%. При обогащении материала объединенных проб по двухстадийной магнитной схеме с использованием сепаратора Р-40 были получены концентраты с общим содержанием железа 59,2-65,0 мас.%.

Было разработаны следующие рекомендации по составу исходного сырья, направляемого на обогащение:

1) содержание в его составе низкожелезистых гематитовых кварцитов (общее содержание железа менее 36 мас.%) не должно превышать 3,1 мас.%;

2) содержание железа, входящего в состав магнетита, не должно превышать 7 мас.%;

3) содержание железа, которое входит в состав гидроксидов железа, не должно превышать 7 мас.%;

4) массовое соотношение плотных и рыхлых разновидностей гематитовых кварцитов должно быть близким к 1:1;

5) содержание в составе шихты труднообогащаемых гематитовых кварцитов не должно быть выше 20-30 мас.%.

В 1990 сотрудники института «Механобрчермет» под руководством Р.Г.Радченко выполнили изучение обогатимости материала 500 малых и 13 объединенных (сортовых) проб гематитовых кварцитов Валявкинского месторождения. Крупность измельчения исхо-

дного материала после первой стадии составляла 70% класса -0,071 мм, после второй стадии – 95% класса -0,044 мм. Степень измельчения материала проб определялось методом Широкинско-Тунцова с использованием лабораторной мельницы 40А-МЛ. Было установлено, что удельная производительность мельницы для получения 70% фракции -0,071 мм колебалась от 0,998 до 0,190 кг/л. ч. Магнитное обогащение проводилось с помощью высокоинтенсивного анализатора ВГМС 10-15-20. В соответствии с результатами испытаний материала малых проб по двухстадийной схеме методом высокоинтенсивного магнитного обогащения, были получены концентраты с общим содержанием железа от 43,6 до 67,1 мас.% при извлечении железа в концентрат от 90,1 до 27,3%.

Магнитный анализ измельченного исходного материала с использованием полиградиентного анализатора 259 СЭ выполнялся по двухстадийной схеме с измельчением руды на первой стадии до 70% класса -0,071 мм, на второй – до 95% класса -0,044 мм. Магнитные фракции выделялись при индукции магнитного поля 0,4 Тл; 1,2 Тл и 1,3 Тл при зазоре между пластинами 4 мм. Результаты анализа показали возможность получения концентрата с общим содержанием железа от 56,7 до 62,7 мас.% при извлечении железа в концентрат от 67,1 до 81,2%.

При обогащении объединенных проб гематитовых кварцитов шестого железистого горизонта с помощью сепаратора Р-40 были получены концентраты с общим содержанием железа от 61 до 63,5 мас.%. При обогащении гематитовых кварцитов пятого железистого горизонта этот показатель колебался в пределах от 59,9 до 61,4 мас.%. При обогащении гематитовых кварцитов с высоким содержанием гидроксидов железа – от 59,1 до 61,6 мас.%. Извлечение железа в концентрат составило, соответственно, 68,9-78,8%; 71,4-73,9% и 65,9-70,4%. Две смеси объединенных (сортовых) проб испытывались в полупромышленных условиях. Содержание железа в полученных концентратах составило 60-61 мас.%, извлечение железа в концентрат – 76,2-74,0%.

Обогащение гематитовых кварцитов по магнитно-флотационной схеме без замкнутого водообмена дало следующие результаты: общее содержание железа в составе концентрата составило 65,7 мас.%, извлечение железа в концентрат – 71,9%.

Для определения возможностей гравитационного обогащения был выполнен гравитационный анализ измельченного до разной крупности материала объединенных проб в тяжелых жидкостях плотностью 2800 и 4200 кг/м³. Было установлено, что при крупности измельчения исходного материала до -0,044 мм может быть получен концентрат с общим содержанием железа от 66,9 до 68,3 мас.%, при крупности измельчения +0,044 мм – от 58,7 до 66,5 мас.%.

Различия в технологических показателях обогащения руд, полученных при гравитационном и магнитном анализе, по мнению авторов, было обусловлено более низкой контрастностью физических свойств минералов при обогащении магнитным способом.

На протяжении 1997-98 гг. сотрудники института «Механобрчермет», в соответствии с техническими заданиями Новокриворожского горнообогатительного комбината (НКГОКа) холдинг-компания «Интермет», разработали рабочий проект реконструкции и технического переоснащения секции № 10 рудообогатительной фабрики № 2 (РОФ-2) для обогащения гематитовых кварцитов Валявкинского месторождения методом высокоинтенсивной магнитной сепарации. В 2000-03 гг. НКГОК и компания «Интермет» построили обогатительную установку и провели пуско-наладочные работы с целью освоения магнитной технологии обогащения гематитовых кварцитов в производственных условиях. Производительность секции составляла 130 т/час и 60 т/час. В процессе нескольких лет работы секции ее проектные показатели не были достигнуты. Лучшие значения параметров обогатимости гематитовых кварцитов были следующие: общее содержание железа в составе концентрата 59 мас.%, извлечение железа в концентрат 54%.

В 2004-05 гг. была проведена реконструкция секции № 10 РОФ-2 НКГОКа на основе результатов научно-исследовательских и про-

ектно-конструкторских работ, выполненных институтом «Механобрчермет», а также составленной институтом «Гипромашуглеобогащение» рабочей документации на восстановление работоспособности сепараторов 6ЭРМ-35/315 и проекта автоматизированной системы управления технологическим процессом, разработанного компанией «Интермет». В 2005 г. были проведены промышленные испытания секции № 10 с целью отработки магнитной технологии обогащения руд после технологической наладки оборудования. Испытания показали работоспособность схемы обогащения и оборудования после его модернизации и реконструкции. Лучший результат был получен при крупности измельчения исходного материала на первой и второй стадиях, соответственно 73% и 94% класса -0,071 мм. Общее содержание железа в составе концентрата составило 61,5 мас.% при извлечении железа в концентрат 64,5%. Концентрат содержал 74% раскрытых рудных частиц, 23% сростков, в том числе 8% трудно раскрываемых бедных, и до 3% раскрытых нерудных частиц (преимущественно, кварцевых).

Научно-производственное объединение «РИВС» по заданию горно-металлургического комбината «Криворожсталь» в условиях минералого-технологической лаборатории Криворожского горнообогатительного комбината окисления руд (КГОКОРа) провело исследование флотационного обогащения гематитовых кварцитов Валявкинского месторождения и дообогащения магнитных продуктов секции № 10 РОФ-2. Были получены такие результаты.

1. С использованием схемы флотационного обогащения гематитовых кварцитов четвертого и шестого железистых горизонтов месторождения можно получить концентрат с общим содержанием железа от 64,4 до 64,9 мас.% при его выходе от 40,8 до 42,6%.

2. При обогащении гематитовых кварцитов по магнитно-флотационной схеме был получен концентрат с общим содержанием железа от 64,3 до 65,2 мас.% при выходе от 38,9 до 47,4%. Магнитная сепарация осуществлялась в одну стадию.

3. Обогащение гематитовых кварцитов по схеме, которая включает две стадии магнитной сепарации и обратную катионную флотацию магнитного продукта, позволило получить концентрат с общим содержанием железа 66,2 мас.% при выходе 30,5%.

При участии Л.Ф.Субботы были проведено изучение возможности гравитационного дообогащения продукта первой стадии магнитной сепарации при крупности измельчения руды 70% класса -0,071 мм. Использовался разработанный Л.Ф.Субботой гравитационный аппарат с орбитальными колебаниями. Были получены концентраты с общим содержанием железа от 63,1 до 64,1 мас.%.

Под руководством В.П.Соколовой в 2005 г. в условиях полупромышленной обогатительной фабрики института «Механобрчермет» выполнялись исследования обогатимости гематитовых кварцитов с использованием гравитационно-магнитной технологии. Обогащение измельченного продукта с использованием винтовых сепараторов компании «Сагрос» в 2 приема уже после 1 стадии измельчения позволило получить до 15% гематитового концентрата с общим содержанием железа от 63 до 63,5 мас.%. Промпродукт гравитационного обогащения подвергался доводке методом магнитной сепарации, в результате был получен концентрат с общим содержанием железа 59-59,5 мас.% выход его составил до 20%.

Сотрудники института «Механобрчермет» под руководством Н.К.Воробьева разработали и проверили в лабораторных и полупромышленных условиях флотационно-магнитную технологию обогащения гематитовых кварцитов Валявкинского месторождения [4, 15]. Использовалась пенная сепарация измельченных до крупности 70% класса -0,071 мм гематитовых кварцитов и магнитное обогащение получаемых промежуточных продуктов. Методом пенной сепарации был получен концентрат с общим содержанием железа 64,4 мас.% при его выходе 30,8% и извлечении железа в концентрат 52,5%. Объединенный концентрат характеризовался общим содержанием железа 62,3-64,0 мас.% при извлечении железа в концентрат 71,3-79,5%.

Анализ результатов изучения обогатимости гематитовых кварцитов привел к выводу о возможности производства из них железорудного (гематитового) концентрата с использованием разных технологических схем. В процессе экспериментов были выявлены также следующие общие недостатки предложенных способов обогащения.

1. Недостаточно учитывались особенности раскрытия минералов при измельчении исходного материала. Применение двухстадийной схемы измельчения гематитовых кварцитов до конечной крупности 95% класса -0,044 мм вызывало их переизмельчение, ошламовывание (образование большого количества частиц крупностью менее 0,02 мм) и, как следствие, неселективное обогащение шламового материала или удаление его в хвосты.

2. По результатам большинства опытов был получен концентрат недостаточно высокого качества, обычно не выше 63-64 мас.%.

3. С повышением содержания железа в составе концентрата до 65-67 мас.% отмечалось значительное увеличение его содержания в отходах обогащения (до 20-30 и более мас.%), а также существенное снижение показателей извлечения железа в концентрат и выхода концентрата.

4. При оптимальном извлечении в концентрат основного рудного минерала – мартита – отмечались слишком высокие потери в отходах обогащения других железорудных минералов, главным образом, железной слюдки и гетита.

5. Во многих случаях отмечалась невоспроизводимость результатов экспериментов при повторном использовании аналогичных технологических схем.

Принимая во внимание особенности минерального, химического состава, структуры, текстуры гематитовых кварцитов, а также физических свойств рудообразующих минералов, можно сделать вывод, что основными операциями, которые могут обеспечить оптимальные показатели обогащения бедных гематитовых руд (гематитовых кварцитов), являются:

– эффективная рудоподготовка (главным образом, усреднение и измельчение исходного сырья);

– оптимальная дешламация продуктов измельчения;

– рациональное обогащение подготовленного (усредненного, измельченного и дешламированного) исходного материала.

С учетом результатов предыдущих исследований и принимая во внимание минералогические особенности гематитовых кварцитов, можно следующим образом сформулировать минералогические рекомендации к разработке оптимальной технологии производства из них высококачественного железорудного концентрата.

1. Процессы выветривания магнетитовых кварцитов месторождений Криворожского бассейна и аналогичных рудных районов планеты, с которыми связано образование гематитовых кварцитов, происходили в неоднородных по минеральному и химическому составу, структуре, текстуре толщах железистых горизонтов. Главным проявлением неоднородности горизонтов является их аутигенно-метаморфогенная минералого-геохимическая зональность [2, 5, 6, 8, 10, 11]. Исходные магнетитовые кварциты каждой минеральной разновидности по-разному изменялись под влиянием гипергенных факторов. Кроме того, в процессе гипергенных изменений в составе залежей гематитовых кварцитов формировались эпигенетические тела их маршалитизированных, окварцованных разновидностей, значительно отличающихся от вмещающих гематитовых кварцитов и между собой по основным минералогическим, химическим и физическим (плотностным, прочностным, электромагнитным и другим) показателям. Минералогическая пестрота залежей гематитовых кварцитов требует для каждого месторождения разработки эффективной схемы усреднения исходного материала перед его измельчением и обогащением.

2. Значительное влияние на эффективность измельчения гематитовых кварцитов оказывает присутствие в их составе минералов и минеральных агрегатов, заметно отличающихся по прочностным характеристикам [2, 9, 11-13,

16-18]. К механически устойчивым относятся выделения метаморфогенного кварца, железной слюдки, гетита; к менее прочным – карбонатов, реликтовых силикатов; к непрочным – землистые агрегаты дисперсного гематита, дисперсного гетита, каолинита. Низкой прочностью характеризуются агрегаты маршалитизированного кварца. Основной рудный минерал гематитовых кварцитов – мартит – вследствие тонкопористой структуры его агрегатов [9, 14], как и минералы низкой прочности, в процессе рудоподготовки проявляет склонность к переизмельчению. В связи с этим можно рекомендовать выбор наиболее щадящих режимов измельчения, проведение его в три вместо использовавшихся в ходе предыдущих исследований двух стадий, а также удаление из продуктов измельчения первой и второй стадий готового к обогащению материала для того, чтобы предупредить его переизмельчение.

3. Выше отмечалось, что в состав гематитовых кварцитов входят минералы (дисперсный гематит, дисперсный гетит, каолинит и другие глинистые минералы, гипергенно измененные силикаты, карбонаты), при измельчении которых образуются очень тонкозернистые (менее 0,02 мм) продукты, представляющие собой шламовую составляющую продуктов измельчения исходного сырья. Склонен к ошламовыванию также мартит [2, 11, 12, 16-18]. Наличие большого количества шламового материала значительно усложняет условия разделения рудных и нерудных минералов при обогащении. В связи с этим при разработке эффективной технологии обогащения гематитовых кварцитов необходимо предусмотреть дешламацию измельченного материала, в процессе которой из него будут удалены аргиллитовые и пелитоморфные частицы рудных и нерудных минералов.

4. Выбор эффективной технологии обогащения руд основан на использовании значительных градиентов физических свойств минералов, подвергающихся разделению [3]. Такие градиенты между рудными и нерудными минералами гематитовых кварцитов месторождения существуют по их плотности, удельной магнитной восприимчивости и флотлируемости. Плотность мартита, железной слюдки, маг-

нетита составляет 5150-5200 кг/м³, гетита и лепидокрокита – 4000-4500 кг/м³, минералов группы кварца в два раза ниже – от 1900-2200 кг/м³ (опал) до 2650 кг/м³ (кварц). Таким образом, обогащение руд с использованием гравитационных аппаратов может быть эффективным.

Рудные и нерудные минералы гематитовых руд значительно отличаются по удельной магнитной восприимчивости. Магнетит относится к сильным ферромагнетикам, которые характеризуются высокой удельной магнитной восприимчивостью. Мартит, железная слюдка, гетит, лепидокрокит – к ферримагнетикам с относительно низкими показателями удельной магнитной восприимчивости. Минералы группы кварца, силикаты, карбонаты – диамагнетики и парамагнетики, практически немагнитные минералы. Таким образом, выделение железо-содержащих минералов может быть обеспечено методом высокоинтенсивной «мокрой» магнитной сепарации. Обстоятельством, которое усложняет этот процесс, является присутствие в составе гематитовых кварцитов рудных минералов, которые сильно отличаются по магнитности – магнетита, гематита, гетита.

Минералы группы кварца, с одной стороны, и рудные минералы, с другой, – характеризуются различной флотуемостью. Таким образом, их разделение возможно с использованием флотореагентов. Но флотационные способы обогащения можно рекомендовать после проведения детальных исследований, направленных на оценку возможных технических, технологических, экологических, санитарно-гигиенических последствий их использования.

Авторами настоящей работы были проведены более 250 опытов по изучению обогатимости гематитовых кварцитов. Анализ их результатов показал, что минералогически, физически, химически, технологически, технически, экологически, экономически оптимизированными методами обогащения гематитовых кварцитов могут быть гравитационный или комбинированные магнитно-гравитационный или гравитационно-флотационный. Выбор технологии должен опираться на минералогиче-

ское и технологическое изучение особенностей гематитовых кварцитов каждого месторождения.

Выводы

1. Анализ результатов ранее выполненных минералого-технологических исследований и технологических испытаний позволяет сделать заключение о возможности получения высококачественного железорудного концентрата из гематитовых кварцитов докембрийской железисто-кремнистой формации с использованием разных методов обогащения.

2. Крайне важной является оптимизация процессов рудоподготовки: усреднения исходного сырья перед подачей на обогатительные фабрики, его эффективного измельчения и дешламации продуктов измельчения.

3. Наиболее эффективными являются гравитационный и комбинированные магнитно-гравитационный, гравитационно-флотационный методы обогащения. Выбор технологии для каждого конкретного месторождения должен опираться на результаты минералогического и технологического изучения особенностей гематитовых кварцитов, слагающих его продуктивную толщу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ашитков Ю.Р.* Применение винтовых сепараторов для обогащения железных руд // *Обогащение руд.* – 1965. – №4.
2. *Белевцев Я.Н., Тохтуев Г.В., Стрыгин А.И. и др.* Геология Криворожских железорудных месторождений // Киев: Изд. АН УССР, 1962. – Т. 1 – 484 с., т. 2 – 567 с.
3. *Берлинский А.И.* Разделение минералов // Москва: Недра, 1988. – 229 с.
4. *Воробьев Н.К., Соколова В.П.* Разработка технологии комбинированного обогащения окисленных железных руд / *Новое в технологии и технике переработки минерального сырья. Сборник научных трудов института Механобрчермет // Кривой Рог: Институт Механобрчермет, 2007.* – С. 16-24.
5. *Дмитриев Э.В., Кравченко В.М.* Процессы глубинного выветривания и зональность их проявления в Саксаганском районе Кривого Рога // *Геология рудных месторождений.* – 1965. – № 5. – С. 76-90.

6. **Додатко О.Д., Дорфман Я.З.** Про кору вивітряння порід залізо-кремнистої формації Криворіжжя // Доповіді АН УРСР. Серія Б.– 1973.– № 5.– С. 395-398.
7. **Євтехов В.Д.** Альтернативная минерально-сырьевая база железорудных месторождений Кривбасса / Разработка рудных месторождений // Кривой Рог: Криворожский технический университет, 1997.– С. 121-125.
8. **Євтехов В.Д., Мачадо О.Т., Беспояско Е.О.** Топомінералогія кори вивітряння саксаганської світи Інгулецького родовища // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету.– 2002.– №2 (8).– С. 5-17.
9. **Євтехов В.Д., Євтехов Є.В., Ніколаєнко К.В., Філенко В.В., Смірнов О.Я.** Геологічний аспект оптимізації подрібнення гематитових кварцитів при їх підготовці до збагачення (на прикладі Валявкинського родовища Кривбасу) // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету. – 2012. – №2. – С. 47 – 53.
10. **Мартынченко Л.И., Попов Е.А., Татунь Г.Т. и др.** Основные закономерности формирования коры выветривания железистых пород Кривого Рога // Геология рудных месторождений.– 1971.– № 5.– С. 87-97.
11. **Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н.** Технологическая минералогия железных руд // Ленинград: Наука, 1988.– 302 с.
12. **Поваренных А.С.** К вопросу о природе гидроокислов железа в красковых рудах Криворожского бассейна / Геология и горное дело. Сборник научных трудов НИГРИ // Москва: Металлургиздат, 1959.– №2.– С. 253-256.
13. **Ревнищев В.И.** О рациональной организации процесса раскрытия минералов в соответствии с современными представлениями о физике твердого тела / Совершенствование и развитие процессов подготовки руд к обогащению. Труды института «Механобр» // Ленинград, 1975.– Вып. 140.– С. 153-169.
14. **Смірнов О.Я., Євтехов В.Д., Євтехов Є.В.** Мінералогічне обґрунтування оптимальної технології збагачення гематитових кварцитів Валявкинського родовища Криворізького басейну // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету. – 2011. – №1 (25).– С. 38-50.
15. **Соколова В.П.** Закономерности раскрытия гематитовых кварцитов Кривбасса и повышение селективности их флотационного обогащения / Автореф. канд. дис. // Кривой Рог: Криворожский технический университет, 2006.– 22 с.
16. **Юрк Ю.Ю.** Процеси мартитизації і утворення мартиту в породах і рудах Кривого Рогу / Матеріали з мінералогії України. Труды Інституту геологічних наук АН УРСР // Київ: Вид. АН УРСР, 1960.– Вып. 6.– С. 58-80.
17. **Юрк Ю.Ю., Шнюков Е.Ф.** Рудные минералы Криворожской железорудной полосы // Киев: Изд. АН УССР, 1958.– 100 с.
18. **Ярошук М.А., Епатко Ю.М.** Мартитизация магнетита в глубинных зонах окисления докембрийских железисто-кремнистых формаций // Геологический журнал.– 1976.– №2.– С. 15-20.

ЄВТЕХОВ В.Д., ПЕРЕГУДОВ В.В., ЄВТЕХОВ Є.В., ДУДАР Л.Т., ФІЛЕНКО В.В., СМІРНОВ О.Я., БІЛЕНКО А.Є., НІКОЛЕНКО Є.М. Геологічна оцінка результатів пошуку оптимальної схеми збагачення гематитових кварцитів залізо-кремнистої формації докембрію.

Резюме. Родовища залізо-кремнистої формації характеризуються значною різноманітністю мінеральних, генетичних, промислових різновидів залізних руд. В країнах СНД видобуваються, переважно, багаті залізні руди (вміст заліза понад 46 мас.%) і бідні магнетитові руди (магнетитові кварцити). Через поступове вичерпання покладів обох цих видів, для родовищ Криворізького басейну, Білозерського залізорудного району, Курської магнітної аномалії, починаючи з 60-х років ХХ ст., декілька наукових і науково-виробничих організацій виконують дослі-

дження збагачуваності бідних залізних руд ще одного різновиду – гематитових кварцитів. Результати цих досліджень і дані, одержані авторами статті, свідчать про можливість виробництва з гематитових кварцитів високоякісного залізородного (гематитового) концентрату з використанням декількох технологічних схем. Найбільш ефективними є гравітаційний і комбіновані магнітно-гравітаційний, гравітаційно-флотаційний методи збагачення. Вибір технології для кожного конкретного родовища повинен ґрунтуватись на результатах мінералогічного й технологічного вивчення особливостей гематитових кварцитів, які складають його продуктивну товщу. Важливе значення має оптимізація процесів рудопідготовки: усереднення вихідної сировини перед подачею на збагачувальні фабрики, ефективного її подрібнення, дешламації продуктів подрібнення.

Ключові слова: залізисто-кремніста формація докембрію, Криворізький залізородний басейн, гематитові кварцити, мінералогія, збагачення.

ЕВТЕХОВ В.Д., ПЕРЕГУДОВ В.В., ЕВТЕХОВ Е.В., ДУДАРЬ Л.Т., ФИЛЕНКО В.В., СМИРНОВ А.А., БИЛЕНКО А.Е., НИКОЛЕНКО Е.М. Геологическая оценка результатов поиска оптимальной схемы обогащения гематитовых кварцитов железисто-кремнистой формации докембрия.

Резюме. Месторождения железисто-кремнистой формации характеризуются значительным разнообразием минеральных, генетических, промышленных разновидностей железных руд. В государствах СНГ добываются, преимущественно, богатые железные руды (содержание железа более 46 мас.%) и бедные магнетитовые руды (магнетитовые кварциты). Вследствие постепенного истощения залежей обоих этих видов, для месторождений Криворожского бассейна, Белозерского железорудного района, Курской магнитной аномалии, начиная с 60-х годов XX ст., несколько научных и научно-производственных организаций выполняют исследования обогатимости бедных железных руд еще одной разновидности – гематитовых кварцитов. Результаты этих исследований и данные, полученные авторами статьи, свидетельствуют о возможности производства из гематитовых кварцитов высококачественного железорудного (гематитового) концентрата с использованием нескольких технологических схем. Наиболее эффективными являются гравитационный и комбинированные магнитно-гравитационный, гравитационно-флотационный методы обогащения. Выбор технологии для каждого конкретного месторождения должен основываться на результатах минералогического и технологического изучения особенностей гематитовых кварцитов, которыми сложена его продуктивная толща. Важное значение имеет оптимизация процессов рудоподготовки: усреднения исходного сырья перед подачей на обогатительные фабрики, эффективного его измельчения, дешламации продуктов измельчения.

Ключевые слова: железисто-кремнистая формація докембрія, Криворожський залізородний басейн, гематитові кварцити, мінералогія, збагачення.

EVTEKHOV V.D., PEREGUDOV V.V., EVTEKHOV E.V., DUDAR L.T., FILENKO V.V., SMIRNOV O.Ya., BILENKO A.Ye., NIKOLENKO Ye.M. Geological assessment for the results of search for optimal concentration flow sheet for hematite quartzites of Precambrian banded iron formation.

Summary. Deposits of the Kryvyi Rih basin, Kremenchuh and Bilozerka region, Kursk Magnetic Anomaly and other analogous regions of the planet are characterized by big diversity of mineral, genetic, industrial kinds and varieties of iron ores. There are several kinds of high-grade (more than 46 % of iron) and low-grade (25-46 mas. % of iron) magnetite, hematite and goethite ores in the sections of productive masses of the deposits.

Industrial working out started in 1881 with high-grade hematite and ironstone ores removal, then, with mines deepening, magnetite ores were involved into production. Since the middle of the XX-s century exploitation of considerably larger magnetite quartzites deposits has been conducted. Deposits of high-grade magnetite and ironstone ores have practically been exhausted, high grade hematite ores and magnetite quartzites deposits are steel being mined.

But involving low grade hematite ores (hematite quartzites that are products of magnetite quartzites weathering) into exploration is becoming more topical due to the gradual exhausting of proved reserves of above mentioned two types of ores. Systematical researches for the possibility of efficient concentration for hematite quartzites in order to produce high quality iron ore concentrate started in the 50-s early 60-s of XX-th century. Working out concentrations technologies and developing new beneficiation equipment for flow sheets implementation have been fulfilled in educational, scientific-research and project institution "Mekhanobr" (Sankt-Petersbourg), "Mekhanobrchermet" (Kryvyi Rih), "Gipromachugleobogashchenie" (Lugansk), "Gamayun" (Kryvyi Rih), "Prodekologiya" (Rivne), "RIVS" (Sankt-Petersbourg), Kryvyi Rih mining institute (now Kryvyi Rih national university), Kriviy Rih concentration complex for oxidized ores (KGOKOR), Institute of mineral resources (now Crimean branch of Ukrainian scientific-research geological exploration institute), "Magnus" (Lugansk), "Progress" (Berdichev), "Spirit" (Irkutsk), "Aeromekh" (Lugansk) and others for than 50 years.

Analysis of hematite quartzites dressability studies resulted in the conclusion on possibility of iron ore (hematite) concentrate production applying various flow sheets. The following general disadvantages of suggested concentrations ways were found during the studies.

1. Peculiarities of mineral release when grinding initial material. Application of two stage scheme of hematite quartzites grinding to 95% of -0,044 mm product size caused their overgrinding, sludging (formation of big amount of particles size less than 0,02 mm) and, consequently, non-selective beneficiation of sludge material or disposing it into tailings.

2. Results of majority of tests confirmed obtaining of insufficiently high quality concentrate, usually less than 63-64 mas. %.

3. Increase in iron content in concentrate up to 65-67 % mas.% was followed by considerable increase in iron in beneficiation wastes (up to 20-30 mas. % and more) as well as by essential decrease in iron degree of extraction into concentrate and concentrate yield.

4. There were too high losses of other iron ore minerals, mainly specularite and goethite in beneficiation wastes at optimal extraction into concentrate of main ore mineral – martite.

5. In many cases non-reproducibility of tests results when re-using analogous flow sheets took place.

Taking into account peculiarities of mineral, chemical composition, structure and texture of hematite quartzites as well as physical properties of ore forming minerals, it is possible to make a conclusions that following operations providing optimal indexes of low grade hematite ores (hematite quartzites) beneficiation are fundamental:

1. Hematite quartzites deposits are mineralogically unhomogeneous. Their structure inherits autochthonous mineralogical zonality of primary deposits of magnetite quartzites. On top of that, during weathering process epigenetic bodies of marshalitized, silicified varieties of hematite quartzites were formed in the deposits. As a results hematite quartzites varieties significantly differing after their mineralogical, chemical and physical properties occur in the deposits. Mineralogical mottle of hematite quartzites deposits requires elaborating efficient homogenizing initial material scheme before its grinding and beneficiating.

2. Presence of minerals and mineral aggregates of different rigidity in hematite quartzites influence ore grinding efficiency. Quartz, specularite, goethite refer to mechanically stable minerals, carbonates and relict silicates are less steadfast, dispersed hematite, dispersed goethite and kaolinite are feeble minerals. Aggregates of marshalitised quartz have low rigidity. Martite, which is main ore minerals of hematite quartzites, is also unsteadfast due to fine-pored structure of its aggregates and it can easily be overgrinded during the process of ore pretreatment. In this connection it is necessary to choose more

careful regimes of hematite quartzites grinding. Ready to beneficiating material should be removed after each beneficiation stage in order to prevent its overgrinding.

3. Hematite quartzites contain considerable amount of minerals overgrinding of which creates fine-grained (less than 0,02 mm) material, representing sludge constituent of initial raw material grinding products. They are dispersed hematite, dispersed goethite, kaolinite, hypergenically changed silicates, carbonates, marshalitised quartz. Big amount of sludge material complicates separation of ore minerals from non-ore ones during beneficiation process. In this connection it is necessary to choose efficient desludging of grinded material when elaborating technology of hematite quartzites beneficiation.

4. The choice of efficient ore beneficiation technology is based on the use of considerable gradients of physical properties of separated minerals. These gradients between ore and non-ore minerals of hematite quartzites of the deposit exist in density, specific magnetic susceptibility, floatability. Results of mineralogical and technological studies of the present work authors showed the fact that gravitational as well as combined magnetic-gravitational and gravitational-floatational methods are the most optimized methods for beneficiating hematite quartzites from mineralogical, physical, technological, technical, ecological and economical points of view. The choice of technology should be based on mineralogical and technological study of hematite quartzites peculiarities for each deposits.

Key words: Pre-cambrian banded iron formation, Kriviy Rih iron ore basin, hematite quartzites, mineralogy, beneficiation.

*Надійшла до редакції 11 квітня 2012 р.
Представив до публікації професор О.І.Матковський.*