

УДК 553.31 : 549 : 622.7 (477.63)

DOI:10.31721/2306-5443-2017-38-2-30-43

Прилепа Д.Н., Евтехов В.Д., Евтехова А.В.,
Смирнов А.Я., Филенко В.В., Николаенко К.В.

ИЗМЕЛЬЧАЕМОСТЬ ГЕМАТИТОВЫХ МАРШАЛЛИТОВ ЮЖНОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО РАЙОНА КРИВОРОЖСКОГО БАССЕЙНА

Приведены данные химического, минералогического, технологического изучения перспективного вида железорудного сырья Кривбасса – бедных гематитовых руд, нуждающихся в обогащении. На основе этих данных, в соответствии со степенью маршаллитизации исходных гематитовых кварцитов выделены пять разновидностей одного из видов гематитового сырья – гематитовых маршаллитов. Изложены результаты изучения изменения их измельчаемости в зависимости от проявления природных и техногенных факторов. Показано, что с увеличением интенсивности маршаллитизации и продолжительности измельчения в шаровой мельнице эффективность измельчаемости гематитовых маршаллитов закономерно возрастает.

Актуальность. Гематитовые кварциты, которые являются продуктом гипергенных изменений исходных магнетитовых кварцитов железисто-кремнистой формации докембрия [2, 5, 6, 9, 10, 13], в настоящее время изучаются как перспективное железорудное сырье Криворожского бассейна. Систематическое изучение локализации, морфологии, неоднородности строения залежей гематитовых кварцитов, их минерального и химического состава, обогатимости проводится, начиная с 60 годов XX ст. [4, 8]. Однако до настоящего времени не разработаны оптимальные технологические схемы рудоподготовки и обогащения гематитового сырья. Причина состоит в недостаточной геологической, минералогической изученности гематитовых кварцитов и продуктов их эпигенетических преобразований (маршаллитизации, гипергенного оквация, гетитизации и др.).

Образование залежей гематитовых кварцитов происходило на протяжении более 2 млрд.

лет существования Украинского щита (УЩ) и в его составе Криворожского бассейна в континентальных условиях. В результате сформировалась кора выветривания железистых пород. В границах Северного железорудного района (рис. 1) ее вертикальная мощность не превышает нескольких десятков метров, локально достигает 150 м. Максимальное значение – более 2500 м – вертикальная мощность коры выветривания имеет в границах Саксаганского района. В пределах изученного авторами Южного железорудного района глубина распространения тел гематитовых кварцитов изменяется от нескольких десятков метров в южной части Скелеватского месторождения до более 1000 м в северной части Валявкинского месторождения. Близкие показатели отмечены для Лихмановского железорудного района – от менее 50 м в его южной части до более 1500 м в центральной и северной [4, 8].

Значительная часть коры выветривания в связи с пенеппенизацией УЩ размыта и в

настоящее время фиксируются только ее корневые части.

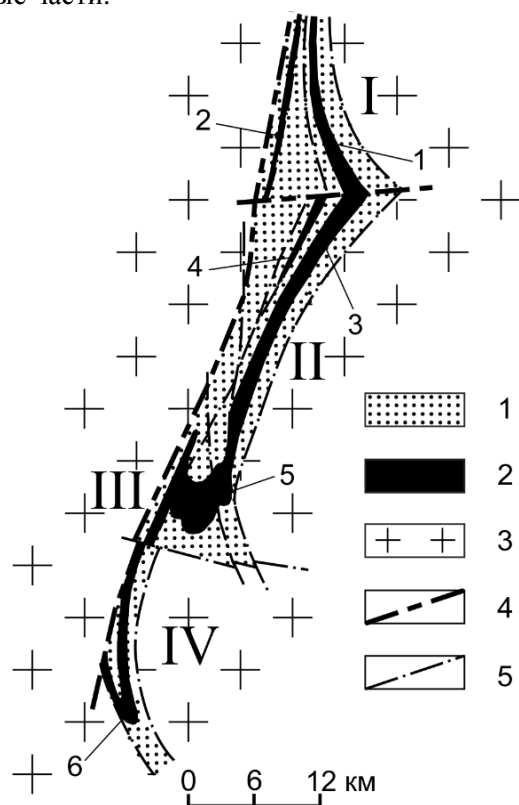


Рис. 1. Железорудные районы и железорудные полосы Криворожского бассейна.

1 – вмещающие метаморфические горные породы криворожской серии; 2 – железистые кварциты и сланцы саксаганской свиты; 3 – гранитоиды днепрпетровского комплекса; 4 – глубинные (мантийные) разломы; 5 – разломы высоких порядков (коровые).

Железорудные районы: I – Северный (Анновский); II – Центральный (Саксаганский); III – Южный; IV – Ингулецкий (Лихмановский).

Железорудные полосы: 1 – Восточно-Анновская; 2 – Западно-Анновская; 3 – Дальние Западные полосы; 4 – Саксаганская; 5 – участок замыкания Основной криворожской синклинали структуры; 6 – Лихмановская.

Авторы изучали залежи гематитовых кварцитов четвертого, пятого, шестого железистых горизонтов Склеватского и Валявкинского месторождений, которые в 70-80 гг. XX ст.

готовились в качестве сырьевой базы для строящегося Криворожского горно-обогатительного комбината окисленных руд (КГОКОРа).

На протяжении последних лет предложенные технологии рудоподготовки и обогащения бедных гематитовых руд, которые должны были быть реализованы в технологической схеме КГОКОРа, были признаны неоптимальными.

Разработку новых технологий необходимо основывать на результатах детального геологического, минералогического химического изучения сырья в том числе его вариативности по минеральному, химическому составу, структуре, текстуре, техническим и технологическим характеристикам. Главная причина высокой вариативности состава и свойств гематитовых руд состоит в формировании вертикальной минералогической зональности коры выветривания железистых горизонтов, образования зон маршаллитизации и гипергенного окварцевания гематитовых кварцитов и др.

Целью работы было изучения влияния интенсивности маршаллитизации на измельчаемость гематитовых кварцитов разного минерального и химического состава как на один из важнейших технических параметров, определяющих готовность продуктов измельчения к эффективному обогащению.

Для достижения цели решались следующие **задачи**: 1) отбор представительных минералого-технологических проб с учетом разной интенсивности маршаллитизации гематитовых кварцитов и разного положения точек опробования в разрезах зональных тел гематитовых маршаллитов; 2) детальное минералогическое изучение материала проб с определением его минерального, химического состава, структуры, текстуры; 3) с учетом минералогических характеристик рудного материала разделение проб на пять групп, соответствующих гематитовым кварцитам с разной степенью маршаллитизации: неизмененные, слабо-, умеренно-, сильно и очень сильно маршаллитизированные; 4) экспериментальное определение измельчаемости гематитового сырья выделенных пяти разновидностей; 5) обобщение полу-

ченных данных и оценка влияния маршаллитизации гематитовых кварцитов на измельчаемость как один из основных технических параметров, определяющих эффективность их рудоподготовки.

Исходный материал и методика работы.

Были отобраны 320 рядовых минералогических проб гематитовых кварцитов четвертого, пятого, шестого железистых горизонтов Скелеватского и Валявкинского месторождений. Масса каждой пробы составляла около 20 кг. Из них были выделены наиболее представительные 98 рядовых проб неизменных гематитовых кварцитов и их в разной степени маршаллитизированных разновидностей. Из материала каждой пробы с использованием стандартных методик были отобраны навески для изготовления прозрачных, полированных шлифов, выполнения сокращенного фазового анализа железа (определение содержания $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{магн.}}$) и проведения испытаний измельчаемости гематитового сырья. Изучение минерального состава руд и фазового состава железа было необходимо для определения степени маршаллитизации гематитовых кварцитов. В соответствии с результатами минералогических и химических исследований, материал 98 рядовых проб был скомпонован в 5 объединенных проб, одна из которых представляла исходные (не неизменные в связи с маршаллитизацией) гематитовые кварциты, а четыре – гематитовые кварциты с разной степенью маршаллитизации.

Изучение измельчаемости гематитовых кварцитов 5 объединенных проб проводилось в водной среде по методике М.К.Широкинского и А.Г.Тунцова [3] с использованием лабораторной шаровой мельницы 40-МЛ. С учетом результатов ранее проведенных аналогичных испытаний гематитовых кварцитов Южного железорудного района [12, 13], время измельчения материала каждой пробы было 5, 10, 15 минут. Продукты измельчения разделялись на гранулометрические фракции +0,16; -0,16+0,1; -0,1+0,071; -0,071+0,05; -0,05+0,02; -0,02+0 мм. Для определения выходов материала фракций от +0,16 до +0,05 мм использовались лабораторные сита стандартного набора. Материал фракции -

0,05+0 мм подвергался седиментационному анализу по методу А.Н.Сабанина [11] с целью разделения на две гранулометрические фракции -0,05+0,02 и -0,02+0 мм. Материал всех фракций взвешивался и полученные данные использовались для расчета выхода гранулометрических фракций продуктов измельчения.

Результаты исследований и обсуждение.

При анализе полученных результатов авторы исходили из соображения, что эффективность измельчения маршаллитов зависит от природных и технических факторов. Главным техническим фактором является время измельчения гематитового сырья. Главный природный фактор – интенсивность маршаллитизации гематитовых кварцитов. Другие природные факторы (вариативность количественного соотношения минералов в составе гематитовых маршаллитов, структуры, текстуры) имели незначительное влияние на результаты испытаний, поскольку материал исходных проб был тщательно усреднен при их подготовке.

Данные геологических наблюдений при отборе рядовых проб и минералогическом (макроскопическом, микроскопическом) изучении их материала, результаты фазового анализа железа показали, что тела гематитовых кварцитов зональны. Зоны представлены исходными гематитовыми кварцитами и гематитовыми маршаллитами с разной степенью маршаллитизации (рис. 2).

1. Исходные гематитовые кварциты формировались в результате выветривания первичных магнетитовых кварцитов, слагающих железистые горизонты саксаганской свиты. Их тела унаследовали не только пластовую форму, но и характерную для железистых горизонтов аутигенную минералогическую зональность [6, 9, 10, 13, 14, 16].

В связи с этим минеральный состав гематитовых кварцитов в центральных зонах четвертого, пятого и шестого железистых горизонтов железослюдко-мартит-кварцевый; в промежуточных – мартит-кварцевый и дисперсногематит-мартит-кварцевый; в периферийных – мартит-дисперсногематит-кварцевый, дисперсногематит-кварцевый, каолинит-дисперсногематит-кварцевый.

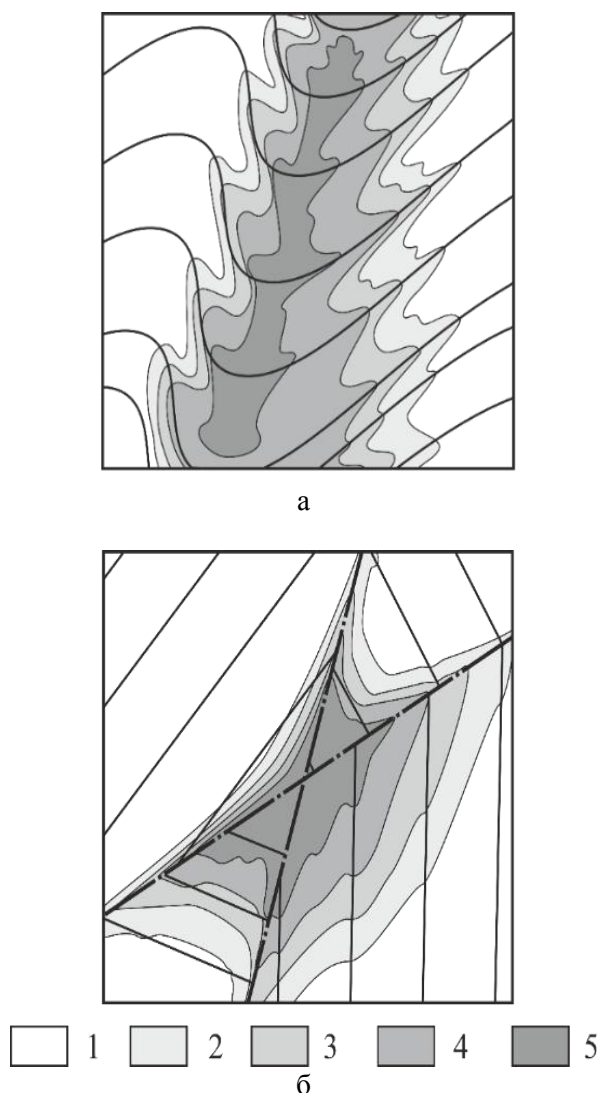


Рис. 2. Схемы строения зональных тел гематитовых маршаллитов в шарнире синклинальной складки (а) и в месте пересечения двух секущих разрывных нарушений (б).

Разновидности гематитовых кварцитов: 1 – неизменные; 2 – слабо маршаллитизированные; 3 – умеренно маршаллитизированные; 4 – сильно маршаллитизированные; 5 – очень сильно маршаллитизированные (гематит-кварцевая «сыпучка»).

Исследования как неизменных, так и маршаллитизированных гематитовых кварцитов проводились для центральных и промежуточных зон всех трех железистых горизонтов.

Для гематитовых кварцитов мартит-дисперсногематит-кварцевого, дисперсногематит-кварцевого, каолинит-дисперсногематит-кварцевого состава, маломощные пластовые тела которых встречаются в периферийных частях четвертого, пятого и шестого железистых горизонтов, исследования не проводились по двум причинам: 1) их маломощные тела составляют не более 3% от общего объема каждого из изученных железистых горизонтов; 2) гематитовые кварциты и маршаллиты такого состава характеризуются низким общим содержанием железа ($Fe_{общ.}$) и содержанием железа в составе извлекаемых минеральных фаз (мартит, железная слюдка, реликтовый магнетит); в связи с этим для них характерны низкие показатели обогатимости. В процессе добычи руд они совместно со вскрышными горными породами (сланцами, малорудными и нерудными железистыми кварцитами) будут направляться в отвалы.

Неизменные (не подвергшиеся маршаллитизации) гематитовые кварциты характеризуются общим содержанием железа, близким к соответствующему показателю исходных магнетитовых кварцитов – от 35 до 45 масс.%, среднее значение 38,57 масс.% (табл. 1). Содержание железа, входящего в состав реликтового магнетита ($Fe_{магн.}$), в коре выветривания изученных месторождений изменяется от менее 0,1 до 15,0 масс.%. В табл. 1 приведены средние значения содержания $Fe_{общ.}$ и $Fe_{магн.}$ в составе материала изученных проб. **Слабо маршаллитизированные гематитовые кварциты** характеризуются начальными проявлениями маршаллитизации вдоль секущих трещин и контактов рудных и нерудных слоев – поверхностей повышенной проницаемости гипергенных растворов. Это фиксируется по осветлению и снижению прочности гематитовых кварцитов. Минеральный состав слабо отличается от состава неизменных гематитовых кварцитов, но для всех изученных проб отмечается четкая тенденция к незначительному уменьшению содержания гематита. Результаты количественных микроскопических подсчетов показали, что в первую очередь растворению подвергается тонкочешуйчатый («эмульсионный») гематит нерудных просло-

ев, слабее растворяется мартит рудных прослоев. В дисперсногематит-мартитовых кварцитах, которые слагают периферийные зоны всех изученных железистых горизонтов,

наблюдается первоочередное растворение дисперсного гематита рудно-силикатных прослоев, значительно слабее растворяется мартит рудных прослоев.

Таблица 1.

Среднее содержание железа в составе маршаллитизированных гематитовых кварцитов

Гематитовые кварциты	n	Fe _{общ.} , масс. %	Fe _{магн.} , масс. %
неизмененные	26	38,57	0,83
слабо маршаллитизированные	22	38,04	0,74
средне маршаллитизированные	20	37,32	0,57
сильно маршаллитизированные	16	36,72	0,49
очень сильно маршаллитизированные (кварц-гематитовая «сыпучка»)	14	36,28	0,27

n – количество определений.

Вдоль каналов фильтрации щелочных гипергенных растворов [7] в гематитовых кварцитах всех минеральных разновидностей происходит растворение кварца с выносом SiO₂ за пределы зон маршаллитизации. Оно сопровождается упрощением формы индивидов кварца и вызванным этим ослаблением связей между индивидами, уменьшением прочности гематитовых кварцитов. При дроблении руд раскалывание происходит, преимущественно, по поверхностям маршаллитизации.

В связи с совместным растворением кварца и гематита, выносом SiO₂ и Fe₂O₃ за пределы зон маршаллитизации количественное соотношение оксидов кремния и железа в составе гематитовых кварцитов меняется слабо. Но результаты химических анализов показывают, что более активно выносятся окисное железо. В связи с этим среднее содержание железа в слабо маршаллитизированных гематитовых кварцитах на 0,53 масс. % ниже по сравнению с соответствующим показателем неизменных гематитовых кварцитов (табл. 1). Уменьшается также содержание железа, входящего в состав магнетита – от 0,83 до 0,74 масс. %.

3. Средне маршаллитизированные гематитовые кварциты отличаются от слабо маршаллитизированных разновидностей более заметным проявлением обесцвечивания нерудных прослоев вдоль секущих, послонных трещин, поверхностей контактов рудных и нерудных прослоев. Маршаллитизация рас-

пространялась на расстояние до 2-3 см в стороны от подводящих растворы каналов.

Химический состав гематитовых маршаллитов этой зоны характеризуется более низким общим содержанием железа по сравнению с исходными гематитовыми кварцитами (соответственно, 37,32 и 38,57 масс. %) и содержанием железа в составе магнетита (0,83 и 0,57 масс. %).

4. Сильно маршаллитизированные гематитовые кварциты отличаются количественным преобладанием гематитового маршаллита над реликтовыми фрагментами неизменных гематитовых кварцитов. Последние образуют включения размером от 0,5-1 см до 50 и более см в непрочном, иногда сыпучем материале гематитовых маршаллитов. При дроблении руд маршаллиты активно измельчаются, просеиваются сквозь грохот, реликтовые фрагменты накапливаются в надрешетном продукте.

Для гематитовых маршаллитов этой зоны характерны упомянутые выше тенденции к снижению Fe_{общ.} (от 38,57 до 36,72 масс. %) и Fe_{магн.} (от 0,83 до 0,49 масс. %) по сравнению с неизменными гематитовыми кварцитами (табл. 1).

5. Очень сильно измененные гематитовые кварциты (гематит-кварцевая «сыпучка», «шелестуха») являются конечным членом минералогического ряда гематитовых маршаллитов. Представляют сыпучую смесь растворенных с поверхности частиц кварца и

гематита (мартита, железной слюдки). В этом материале присутствуют мелкие (обычно до 1-2 см) реликты слабо маршаллитизированных гематитовых кварцитов. Рудный материал легко разминается в руке. Характеризуются минимальными показателями среднего содержания $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{магн}}$ (табл. 1). Количество $Fe_{\text{общ}}$ в их составе более чем на 2 масс.% ниже по сравнению с соответствующим показателем неизмененных гематитовых кварцитов.

Изменение в связи с маршаллитизацией минерального состава, структуры агрегатов мартита и кварца, прочности гематитовых кварцитов влияет на эффективность их измельчения при подготовке гематитового сырья к обогащению.

Данные минералогических исследований и результаты экспериментов по определению измельчаемости материала проб были обобщены с целью определения влияния природных (интенсивность маршаллитизации) и технических (время измельчения) факторов на эффективность рудоподготовки гематитового сырья перед подачей его на обогащение (табл. 2).

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показал, что с нарастанием интенсивности маршаллитизации гематитовых кварцитов эффективность их измельчения резко возрастает. Это проявляется значительным увеличением выхода наиболее мелкозернистого материала фракций -0,05+0,02 и -0,02+0 мм.

При условии наиболее длительного измельчения (15 мин.) для неизмененных гематитовых кварцитов выход наиболее мелкозернистой фракции составляет 25,3%, для очень сильно маршаллитизированных гематитовых кварцитов практически в два раза выше – 49,6%.

На рис. 3 показаны диаграммы изменения выходов материала изученных гранулометрических фракций в связи с увеличением интенсивности маршаллитизации гематитовых кварцитов.

Как видно, для наиболее крупнозернистого материала (фракция +0,16 мм) характерно наиболее резкое падение содержания от неизмененных к наиболее интенсивно маршаллитизированным их разновидностям. Слабее это

проявлено для фракций -0,16+0,1 и -0,1+0,071 мм. Выходы более тонкозернистого материала в этом направлении возрастают: относительно слабо для фракций -0,071+0,05 и -0,05+0,02, намного более заметно для фракции -0,02+0 мм.

Таблица 2.

Выходы материала гранулометрических фракций, полученных по результатам испытаний измельчаемости гематитовых маршаллитов по методике М.К.Широкинского и А.Г.Тунцова

Гранулометрические фракции, мм	Время измельчения, минуты		
	5	10	15
гематитовые кварциты			
+0,16	37,9	30,7	24,2
-0,16+0,1	20,1	18,5	17,9
-0,1+0,071	13,2	12,9	12,3
-0,071+0,05	5,4	6,1	7,8
-0,05+0,02	6,5	10,8	12,5
-0,02+0	16,9	21	25,3
Всего	100	100	100
слабо маршаллитизированные			
+0,16	34,3	28	19,3
-0,16+0,1	19,2	17,1	16,8
-0,1+0,071	12,4	11,7	10,9
-0,071+0,05	6,3	8	9,2
-0,05+0,02	8,2	11,6	14,1
-0,02+0	19,6	23,6	29,7
Всего	100	100	100
умеренно маршаллитизированные			
+0,16	28,5	23,7	16,5
-0,16+0,1	18,3	16,9	14,9
-0,1+0,071	11,4	10,2	9,7
-0,071+0,05	7,6	9,3	11,1
-0,05+0,02	11,7	15	18,2
-0,02+0	22,5	24,9	29,6
Всего	100	100	100
сильно маршаллитизированные			
+0,16	19,6	16,1	10,4
-0,16+0,1	16,7	13,7	10,8
-0,1+0,071	10,3	9,3	8,5
-0,071+0,05	9	11,2	12,1
-0,05+0,02	16,2	19,9	23,4
-0,02+0	28,2	29,8	34,8
Всего	100	100	100
очень сильно маршаллитизированные			
+0,16	10,4	7,2	4,9
-0,16+0,1	9,3	6,3	4
-0,1+0,071	8	6	3,5
-0,071+0,05	10,8	13,4	15,2
-0,05+0,02	18,9	20,5	22,8
-0,02+0	42,6	46,6	49,6
Всего	100	100	100

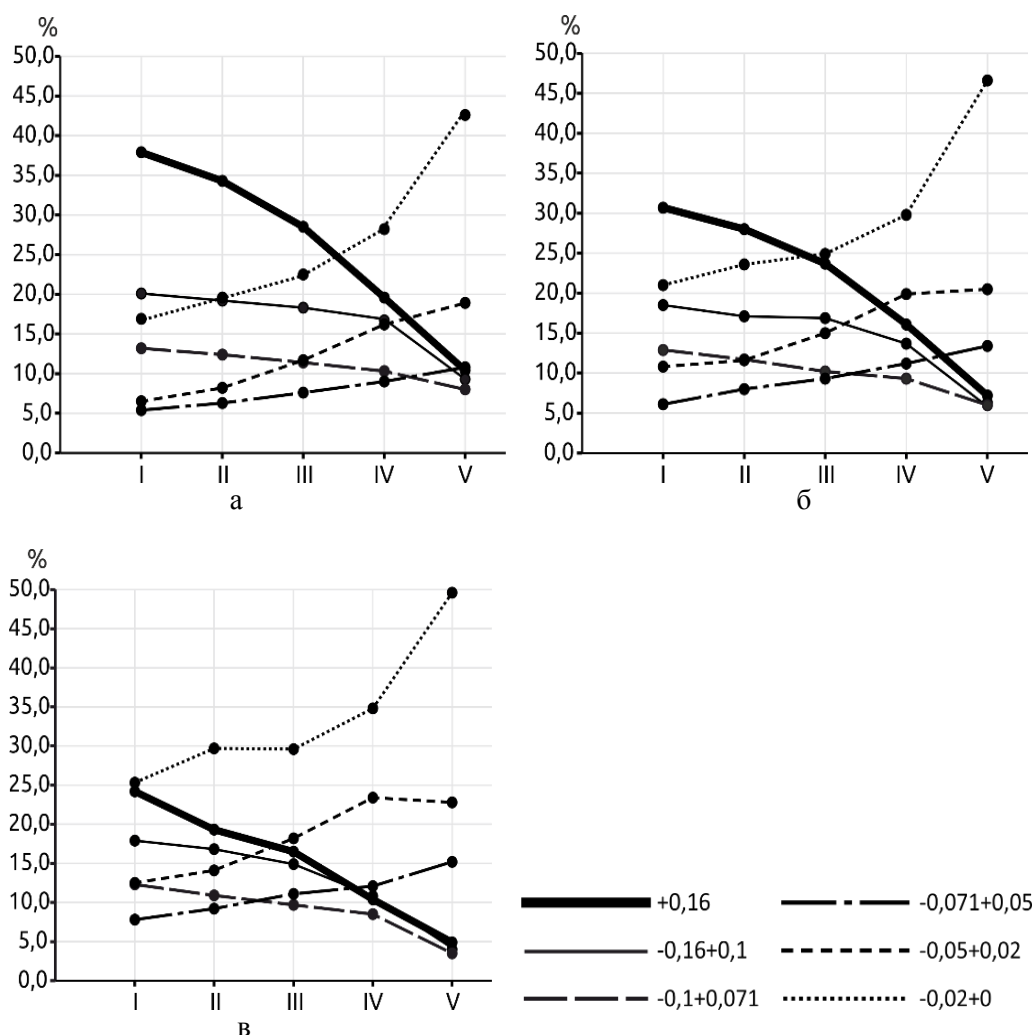


Рис. 3. Зависимость показателей выхода материала разных гранулометрических фракций при измельчении маршаллитизированных гематитовых кварцитов.

Гематитовые кварциты: I – неизменные; II – слабо маршаллитизированные; III – умеренно маршаллитизированные; IV – сильно маршаллитизированные; V – очень сильно маршаллитизированные.

Время измельчения: а – 5 мин.; б – 10 мин.; в – 15 мин.

Влияние техногенного фактора на эффективность измельчения гематитового сырья изучалось в связи с использованием разного времени проведения экспериментов (5, 10, 15 мин). Измельчению подвергался материал всех пяти разновидностей гематитовых кварцитов с разной степенью маршаллитизации.

Анализ данных табл. 2 позволил выявить следующие закономерности. Содержание

наиболее крупнозернистого материала (фракция +0,16 мм) в составе продуктов измельчения всех разновидностей гематитовых маршаллитов заметно уменьшается с увеличением времени измельчения (рис. 4а).

Наиболее заметно это для неизменных гематитовых кварцитов, наименее – для очень сильно маршаллитизированных их разновидностей. Для материала гранулометрических

фракций $-0,16+0,01$ мм и $-0,01+0,071$ мм наклон кривых на диаграммах (рис. 4б, 4в) значительно меньше, что свидетельствует об относительно слабом росте эффективности их измельчения с увеличением времени экспериментов. Максимальным является увеличение

выходов материала этих фракций для очень сильно маршаллитизированных гематитовых кварцитов. Для других видов гематитовых маршаллитов изменение этого показателя мало заметно или не заметно.

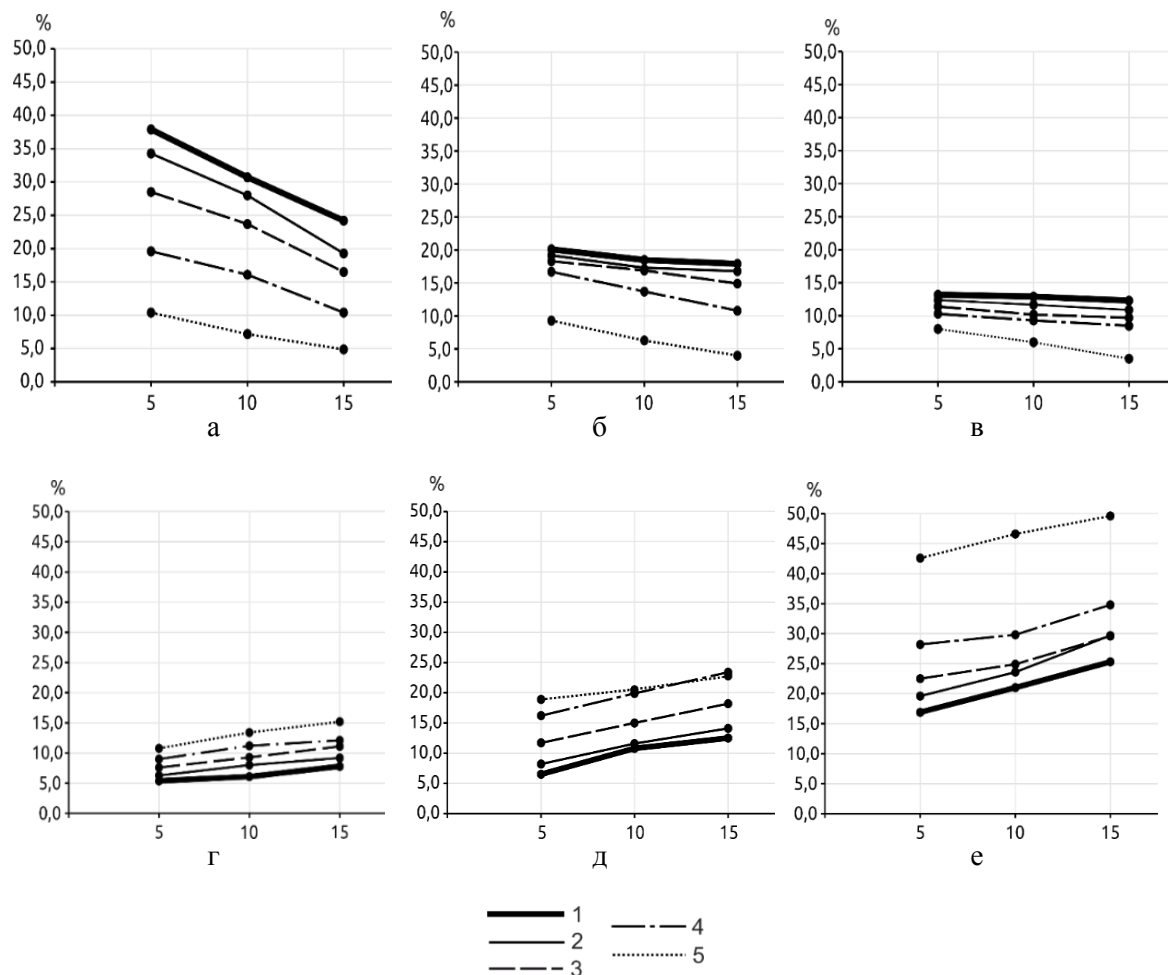


Рис. 4. Влияние времени измельчения маршаллитизированных гематитовых кварцитов (5, 10, 15 мин.) на показатели выхода материала разных гранулометрических фракций.

Гематитовые кварциты: 1 – неизменные; 2 – слабо маршаллитизированные; 3 – умеренно маршаллитизированные; 4 – сильно маршаллитизированные; 5 – очень сильно маршаллитизированные.

Гранулометрические фракции продуктов измельчения: а – $+0,16$ мм; б – $-0,16+0,01$ мм; в – $-0,01+0,071$ мм; г – $-0,071+0,05$ мм; д – $-0,05+0,02$ мм; е – $-0,02+0$ мм.

Обратный тренд изменения содержания в составе продуктов измельчения характерен для более мелкозернистого материала (фрак-

ции с размером частиц менее $0,071$ мм). С увеличением времени экспериментов их количество возрастает: незначительно для материала

с размером частиц $-0,071+0,05$ мм; более заметно для материала гранулометрической фракции $-0,05+0,02$ мм и наиболее сильно для наиболее тонкозернистого материала фракции $-0,02+0$ мм.

Рудообразующие минералы гематитовых маршаллитов – кварц и гематит – заметно отличаются по морфологии индивидов и агрегатов, прочностным характеристикам. В связи с этим при измельчении гематитового сырья, вероятно, происходит перераспределение их по продуктам измельчения. Для получения полной оценки эффективности измельчения руды кроме выполненных гранулометрических исследований необходимо определить минеральный и химический состав материала полученных гранулометрических фракций. С учетом этих данных и данных о выходах гранулометрических фракций можно составить минералогические рекомендации для выбора оптимальной технологии рудоподготовки гематитового сырья.

Выводы

1. Маршаллитизация гематитовых кварцитов происходила в постпалеогеновой коре выветривания железистых пород, сопровождалась выносом под действием щелочных гипергенных растворов кремнезема и трехвалентного железа. Этот процесс продолжается в настоящее время.

2. По степени маршаллитизации выделяют пять разновидностей гематитовых кварцитов: неизменные и слабо-, умеренно-, сильно-, очень сильно маршаллитизированные. Последние представляют гематит-кварцевую «сыпучку».

3. В связи с маршаллитизацией происходит увеличение пористости, разупрочнение гематитовых кварцитов, что определяет изменение их измельчаемости при подготовке гематитового сырья к обогащению.

4. На эффективность измельчения гематитового сырья влияют природные (степень маршаллитизации гематитовых кварцитов) и техногенные (время измельчения гематитового сырья) факторы.

5. В соответствии с экспериментальными данными, как рост степени маршаллитизации

гематитовых кварцитов, так и увеличение продолжительности их измельчения вызывают значительное повышение в получаемых продуктах содержания мелкозернистого материала с крупностью частиц менее $0,05$ мм.

6. Направлением дальнейших исследований является изучение характера перераспределения гематита и кварца по продуктам измельчения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барон Л.И., Коняшин Ю.Г., Курбатов В.М. Дробимость горных пород // Москва: Изд. АН СССР, 1963.– 168 с.

2. Белевцев Я.Н., Тохтуев Г.В., Стрыгин А.И., Мельник Ю.П., Каляев Г.И., Фоменко В.Ю., Загоруйко Л.Г., Моляко Г.И., Половко Н.И., Довгань М.Н., Ладиева В.Д., Жуков Г.В., Епатко Ю.М., Щербаков Б.Д. Геология криворожских железорудных месторождений // Киев: Изд. АН УССР, 1962.– Т. 1 – 484 с., т. 2 – 567 с.

3. Богданова И.П., Нестерова Н.А., Федорченко В.С., Грицай Ю.Л. Обогащаемость железных руд // Москва: Недра, 1989.– 159 с.

4. 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 // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету.– 2013.– №1-2 (29-30).– С. 87-97.

5. Мартыненко Л.И., Попов Е.А., Татунь Г.Т., Зинцова Е.С., Сова Н.Г., Евтехов В.Д., Кондратьева Д.Н. Основные закономерности формирования коры выветривания железистых пород Кривого Рога // Геология рудных месторождений.– 1971.– №5.– С. 87-97.

6. Пирогов Б.И., Стебновская Ю.М., Евтехов В.Д., Ахкозов Ю.Л., Аркос-Видаль Х.Ф., Вальтер А.А., Каталенец А.И., Кудина Л.А., Кушеев В.В., Малых В.М., Пирогова В.В., Раевская М.Б., Романицак А.А., Тарасенко В.Н., Холошин И.В., Шатрубов Л.Л., Ярощук М.А. Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Минералогия // Киев: Наукова думка, 1989.–168 с.

7. **Прилепа Д.М.** Закономірність змін форми кристалів кварцу при маршалітизації гематитових кварцитів / Розвиток промисловості та суспільства. Геологія і прикладна мінералогія. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції (Кривий Ріг, 24-26 травня 2017 р.) // Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2017.– С. 85-87.

8. **Прилепа Д.Н., Євтехов В.Д.** Влияние маршаллитизации на физические и технические показатели гематитовых кварцитов Криворожского бассейна / Материалы XI Конгресса обогатителей стран СНГ (Москва, 13-15 марта 2017 г.) // Москва: Московский институт стали и сплавов, 2017.– С. 82-85.

9. **Прилепа Д.Н., Євтехов В.Д., Євтехова А.В.** Некоторые минералогические особенности маршаллитов Южного железорудного района Криворожского бассейна // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету.– 2016.– №1 (35).– С. 15-26.

10. **Прилепа Д.М., Смирнов О.Я., Євтехов В.Д.** Маршаліти кори вивітряння залізистих кварцитів Валявкінського родовища Кривбасу // Проблеми теоретичної і прикладної мінералогії, геології, металогенії гірничодобувних регіонів. Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції (Кривий Ріг, 27-29 листопада 2014 р.) // Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2014.– С. 70-72.

11. **Рухин Л.Б.** Основы литологии. // Ленинград: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1961.– 778 с.

12. **Смірнов О.Я.** Обгрунтування компоновки представницьких проб бідних гематитових руд Криворізького басейну для виконання їх мінералого-технологічних досліджень (на прикладі Валявкінського родовища) // Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету.– 2012.– №1(27).– С. 85-91.

13. **Смірнов О.Я., Євтехов В.Д., Євтехов Є.В.** Мінералогічна неоднорідність покладів гематитових кварцитів Криворізького басейну (на прикладі Валявкінського родовища) // Вісник Дніпропетровського національного

університету. Серія геологія, географія.– 2012.– Вип. 14.– С. 22–27.

14. **Страхов Н.М.** Основы теории литогенеза // Москва: Изд. АН СССР, 1962.– Т.2.– 575 с.

15. **Тохтұев Г.В., Борисенко В.Г., Тимлянов А.А.** Физико-механические свойства горных пород Кривбасса // Киев: Гостехиздат, 1962.– 102 с.

16. **Ходюш Л.Я.** Аутигенно-минералогическая зональность как один из критериев расчленения и сопоставления железорудных толщ в железисто-кремнистых формациях докембрия (на примере Белозерского железорудного района) / Проблемы изучения геологии докембрия // Ленинград: Наука, 1967.– С. 243-249.

REFERENCES

1. **Baron L.I., Konyashin Yu.G., Kurbatov V.M.** (1963). Breakability of rocks (in Russian) // Moscow: Publishing house of the Academy of sciences of the USSR.– 168 p.

2. **Belevtsev Ya.N., Tokhtuev G.V., Strygin A.I., Melnik Yu.P., Kaliayev G.I., Fomenko V.Yu., Zagoruyko L.G., Molyavko G.I., Polovko N.I., Dovgan M.N., Ladiyeva V.D., Zhukov G.V., Epatko Yu.M., Shcherbakov B.D.** (1962). Geology of Kryvyi Rih iron ore deposits (in Russian) // Kyiv: Publishing house of the Academy of sciences of the Ukrainian SSR.– V. 1 – 484 p., V. 2 – 567 p.

3. **Bogdanova I.P., Nesterova N.A., Fedorchenko V.S., Gritsay Yu.L.** (1989). Iron ores preparability (in Russian) // Moscow: Nedra.– 159 p.

4. **Evtexov V.D., Peregudov V.V., Evtexov E.V., Dudar L.T., Filenko V.V., Smirnov A.Ya., Bilenko A.E., Nikolenko E.M.** (2013). Geological assessment of the results of searching for the optimal scheme for the beneficiation of hematite quartzites of the Precambrian banded iron formation (in Russian) // Geology and mineralogy bulletin of Kryvyi Rih national university.– No 1-2 (29-30).– P. 87-97.

5. **Martynenko L.I., Popov E.A., Tatun G.T., Zintsova E.S., Sova N.G., Evtexov V.D., Kondratyeva D.N.** (1971). The main regularities in the formation of the weathering crust of the ferru-

ginous rocks of Kryvyi Rih (in Russian) // *Geology of ore deposits (Moscow)*. – No. 5. – P. 87-97.

6. **Pirogov B.I., Stebnovskaya Yu.M., Evtexov V.D., Ahkozov Yu.L., Arcos-Vidal H.F., Walter A.A., Katalenets A.I., Kudinova L.A., Kusheev V.V., Malykh V.M., Pirogova V.V., Rayevskaya M.B., Romanshchak A.A., Tarasenko V.N., Holoshin I.V., Shatrubov L.L., Yaroshchuk M.A.** (1989). Banded iron formations of the Precambrian of the European part of the USSR. *Mineralogy (in Russian) // Kyiv: Naukova dumka*. – 168 p.

7. **Prylepa D.M.** (2017). Regularity of changes in the shape of quartz crystals during marshallitization of hematite quartzites (in Ukrainian). *Development of industry and society. Geology and applied mineralogy. Materials of the International scientific and technical conference (Kryvyi Rih, May 24-26, 2017) // Kryvyi Rih: Kryvyi Rih national university*. – P. 85-87.

8. **Prylepa D.N., Evtexov V.D.** (2017). Influence of marshallitization on physical and technical parameters of hematite quartzites of the Kryvyi Rih basin (in Russian) / *Proceedings of the XI Congress of ore beneficiation specialists of CIS countries (Moscow, March 13-15, 2017) // Moscow: Moscow Institute of steel and alloys*. – P. 82-85.

9. **Prylepa D.N., Evtexov V.D., Evtexova A.V.** (2016). Some mineralogical features of marshallites of the Southern iron-ore region of the Kryvyi Rih basin (in Russian) // *Geology and mineralogy bulletin of Kryvyi Rih national university*. – No 1 (35). – P. 15-26.

10. **Prylepa D.M., Smirnov O.Ya., Evtexov V.D.** (2014). Marshallites of the weathering crust of ferruginous quartzites of the Valyavko deposit in the Krivbas (in Ukrainian) // *Issues of theoret-*

ical and applied mineralogy, geology, metallogeny of mining regions. Materials of the IX International scientific and practical conference (Kryvyi Rih, 27-29 November 2014) // Kryvyi Rih: Kryvyi Rih national university. – P. 70-72.

11. **Rukhin L.B.** (1961). *Fundamentals of lithology (in Russian) // Leningrad: State scientific and technical publishing house of petroleum and mining fuel literature*. – 778 p.

12. **Smirnov O.Ya.** (2012). Justification for composing representative samples of low-grade hematite ores of the Kryvyi Rih basin for their mineralogical and technological research (evidence from Valyavko deposit) (in Ukrainian) // *Geology and mineralogy bulletin of the Kryvyi Rih national university*. – No 1 (27). – P. 85-91.

13. **Smirnov O.Ya., Evtexov V.D., Evtexov E.V.** (2012). Mineralogical unevenness of hematite quartzite deposits in the Kryvyi Rih basin (evidence from Valyavko deposit) (in Ukrainian) // *Dnipropetrovsk national university bulletin. Geology, geography series*. – Is. 14. – P. 22-27.

14. **Strakhov N.M.** (1962). *Fundamentals of the theory of lithogenesis (in Russian) // Moscow: Publishing house of the Academy of sciences of the USSR*. – Vol. 2. – 575 p.

15. **Tokhtuyev G.V., Borisenko V.G., Titlyanov A.A.** (1962). *Physical and mechanical properties of rocks of the Kryvbas (in Russian) // Kyiv: Gostekhizdat*. – 102 p.

16. **Khodiush L.Ya.** (1967). Authigenic-mineralogical zonation as one of the criteria for the breakdown and comparison of iron ore strata in the banded iron formations of the Precambrian (evidence from the Belozërka iron ore region) (in Russian) / *Issues of studying the Precambrian geology // Leningrad: Nauka*. – P. 243-249.

ПРИЛЕПА Д.Н., ЄВТЕХОВ В.Д., ЄВТЕХОВА А.В., СМІРНОВ О.Я., ФІЛЕНКО В.В., НІКОЛАЄНКО К.В. Подрібнюваність гематитових маршалітів Південного залізрудного району Криворізького басейну.

Резюме. Гематитові кварцити є продуктом гіпергенних змін вихідних магнетитових кварцитів залізо-кремністої формації докембрію, в поточний час вони вивчаються як перспективна залізорудна сировина Криворізького басейну. Автори дослідили поклади гематитових кварцитів, які складають кору вивітрювання четвертого, п'ятого, шостого залізистих гори-

зонтиів Склеватського та Валявкінського родовищ. В 70-80 рр. ХХ ст. продукти вивітрювання магнетитових кварцитів цих горизонтів розглядалися у якості сировинної бази Криворізького гірничозбагачувального комбінату окиснених руд.

Поклади гематитових кварцитів геологічно, мінералогічно, хімічно неоднорідні. Один з проявів їх гетерогенності – присутність тіл маршалітів.

Маршалітизація гематитових кварцитів відбувалась у зв'язку з найбільш пізньою – постмезозоеною – стадією вивітрювання залізистих порід саксаганської світи криворізької серії. Метеорні розчини, проникаючи через карбонат-вмісні породи палеоген-неогенового осадового чохла, набували лужної реакції (рН близько 9). Їх дія на гематитові кварцити супроводжувалась розчиненням кварцу та гематиту й винесенням SiO_2 і Fe_2O_3 за межі зон маршалітизації. За ступенем маршалітизації виділені п'ять різновидів гематитових кварцитів: незмінні та слабо-, помірно-, сильно-, дуже сильно маршалітизовані. Останні являють гематит-кварцову «сипучку».

В зв'язку з маршалітизацією відбувалось підвищення пористості, розуцільнення гематитових кварцитів, що зумовило зміну фізичних, технічних властивостей, у тому числі подрібнюваності, яка відноситься до провідних факторів, що визначають ефективність підготовки гематитової сировини до збагачення. Була вивчена дія природного (ступінь маршалітизації) та техногенного (час подрібнення в кульовому млині) факторів, які впливають на ефективність подрібнення гематитової сировини. У відповідності з експериментальними даними, як зростання ступеню маршалітизації гематитових кварцитів, так і збільшення терміну подрібнення викликають значне підвищення вмісту тонкозернистого матеріалу (крупність частинок менше 0,05 мм) в одержуваних продуктах. Цю особливість гематитових маршалітів необхідно враховувати при визначенні запасів гематитової сировини, складанні її мінералого-генетичної, мінералого-технічної, мінералого-технологічної класифікації, розробці технологій видобутку, усереднення рудного матеріалу, рудопідготовки, збагачення з метою виробництва високоякісного залізорудного (гематитового) концентрату.

Ключові слова: Криворізький басейн, залізисто-кремніста формація, кора вивітрювання, гематитові маршаліти, мінералогія, подрібнюваність.

ПРИЛЕПА Д.Н., ЕВТЕХОВ В.Д., ЕВТЕХОВА А.В., СМІРНОВ А.А., ФИЛЕНКО В.В., НИКОЛАЕНКО К.В. Измельчаемость гематитовых маршаллитов Южного железорудного района Криворожского бассейна.

Резюме. Гематитовые кварциты являются продуктом гипергенных изменений исходных магнетитовых кварцитов железисто-кремнистой формации докембрия, в настоящее время они изучаются как перспективное железорудное сырье Криворожского бассейна. Авторы исследовали залежи гематитовых кварцитов, слагающих кору выветривания четвертого, пятого, шестого железистых горизонтов Склеватского и Валявкинского месторождений. В 70-80 гг. ХХ ст. продукты выветривания магнетитовых кварцитов этих горизонтов рассматривались в качестве сырьевой базы Криворожского горнообогатительного комбината окисленных руд.

Залежи гематитовых кварцитов геологически, минералогически, химически неоднородны. Одно из проявлений их гетерогенности – присутствие тел маршаллитов.

Маршаллитизация гематитовых кварцитов происходила в связи с наиболее поздней – постмезозоеновой – стадией выветривания железистых пород саксаганской свиты криворожской серии. Метеорные растворы, проникая через карбонат-содержащие породы палеоген-неогенового осадочного чехла, приобретали щелочную реакцию (рН около 9). Их действие на гематитовые кварциты сопровождалось растворением кварца и гематита и выносом SiO_2 и Fe_2O_3 за пределы зон маршаллитизации. По степени маршаллитизации выделены пять разно-

видностей гематитовых кварцитов: неизменные и слабо-, умеренно-, сильно-, очень сильно маршаллитизированные. Последние представляют гематит-кварцевую «сыпучку».

В связи с маршаллитизацией происходило увеличение пористости, разупрочнение гематитовых кварцитов, что обусловило изменение физических, технических свойств, в том числе измельчаемости, которая относится к ведущим факторам, определяющим эффективность подготовки гематитового сырья к обогащению. Было изучено действие природного (степень маршаллитизации) и техногенного (время измельчения в шаровой мельнице) факторов, влияющих на эффективность измельчения гематитового сырья. В соответствии с экспериментальными данными, как рост степени маршаллитизации гематитовых кварцитов, так и увеличение продолжительности измельчения вызывают значительно повышение содержания тонкозернистого материала (крупность частиц менее 0,05 мм) в получаемых продуктах. Эту особенность гематитовых маршаллитов необходимо учитывать при определении запасов гематитового сырья, составлении его минералого-генетической, минералого-технической, минералого-технологической классификаций, разработке технологий добычи, усреднения рудного материала, рудоподготовки, обогащения с целью производства высококачественного железорудного (гематитового) концентрата.

Ключевые слова: Криворожский бассейн, железисто-кремнистая формация, кора выветривания, гематитовые маршаллиты, минералогия, измельчаемость.

PRYLEPA D.M., EVTEKHOV V.D., EVTEKHOVA A.V., SMIRNOV A.Ya., FILENKO V.V., NIKOLAYENKO K.V. Grindability of hematite marshallites of the Southern iron ore region (Kryvyi Rih basin).

Summary. Hematite quartzites are a product of hypergenic changes in the initial magnetite quartzites of the Precambrian banded iron formation; they are currently being studied as a promising iron ore raw material of the Kryvyi Rih basin. The authors have studied the deposits of hematite quartzites, which compose the weathering crust of the fourth, fifth, and sixth ferruginous horizons of the Skelevatka and Valyavko deposits. In the 70-80's of the XX century the products of magnetite quartzites weathering of these horizons were considered as a raw material base for the Kryvyi Rih Oxidized Ores Mining and Processing Plant.

Deposits of hematite quartzites are geologically, mineralogically, chemically heterogeneous. The presence of marshallite bodies is one of the manifestations of their heterogeneity.

Marshallitization of hematite quartzites took place in connection with the latest stage of post-Meso-Neogene weathering of ferruginous rocks of the Saksagan suite of the Kryvyi Rih series. Meteoric solutions, penetrating through carbonate-containing rocks of the Paleogene-Neogene sedimentary cover, acquired an alkaline reaction (pH about 9). Their effect on hematite quartzites was followed by the dissolution of quartz and hematite and the removal of SiO₂ and Fe₂O₃ beyond the boundaries of the marshallitization zones. According to the degree of marshallitization, five varieties of hematite quartzites are distinguished: unaltered and weakly, moderately, strongly, very strongly marshallitized ones. The last-named one represent a hematite-quartz "sympuchka".

Marshallitization caused the increase in porosity, the softening of hematite quartzites, which led to a change in physical and technical properties, including grindability, which is one of the leading factors determining the efficiency of preparation of hematite raw materials for beneficiation. The effect of natural (degree of marshallitization) and man-made (time of grinding in a ball mill) factors influencing the efficiency of grinding hematite raw materials has been studied. In accordance with the experimental data, both the increase in the degree of marshallitization of hematite quartzites and the increase in the duration of grinding cause a significant increase in the content of fine-grained material (particle size less than 0.05 mm) in the products obtained. This feature of hematite marshallites should be taken into

account when evaluating the hematite reserves, composing mineralogical-genetic, mineralogical-engineering, mineralogical-technological classifications, developing mining technologies, blending ore material, ore preparation, beneficiation in order to produce high-quality iron ore (hematite) concentrate.

Key words: Kryvyi Rih basin, banded iron formation, crust of weathering, hematite marshallites, mineralogy, grindability.

Надійшла до редакції 23 грудня 2016 р.

Представив до публікації кандидат геологічних наук Е.О.Беспояско.