

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ ЕРИСТОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Для разработки минералогических рекомендаций, относительно оптимальной технологии обогащения железистых кварцитов Еристовского месторождения, были изучены минеральный состав и петрографическая характеристика двух проб руды. Исследования проводились с использованием химического, гранулометрического, минераграфического, петрографического анализов.

Макроскопическая диагностика минералов, изучение морфологических признаков минеральных частиц, степени раскрытия рудных и нерудных минералов в материале проб, характера сростания минеральных индивидов и агрегатов проводилась с использованием бинокулярных микроскопов МБС-1. Исследования минералов в отраженном свете проводились с использованием минераграфического микроскопа ЕРІТІР, в проходящем свете – с помощью петрографического микроскопа МБИ-6.

С целью определения количественных соотношений минералов в составе проб, кроме микроскопических исследований, проводился пересчет данных силикатного химического анализа и фазового анализа железа на минеральный состав.

Химический состав исходных проб руды характеризуется результатами полного химического и фазового анализов, приведенного в табл. 1.

Из таблицы следует, что массовая доля $Fe_{\text{общ}}$ в пробах составила 36,8 и 35,1; $Fe_{\text{магн.}}$ – 31,8 и 29,4; FeO – 18,4 и 18,0; Fe_2O_3 – 32,1 и 30,2% соответственно пробам 1 и 2. Содержание кремнезема (SiO_2) в обеих пробах – 42,19 и 44,64, глинозема (Al_2O_3) – 0,99 и 1,01 соответственно.

Массовая доля CaO в пробе 1 – 1,07; MgO – 1,87; CO_2 – 2,38; в пробе 2 – 0,60; 1,49 и 3,33 соответственно. Остальные окислы в обеих пробах не превышают десятых долей процента. Вредные примеси – фосфор и сера составляют в пробе 1 – 0,05 (P) и 0,243 (S); в пробе 2 – 0,03 и 0,175% соответственно. Массовая доля потерь при прокаливании в пробах не превышает 2,90 и 3,65%.

Минеральный состав проб, а также распределение железа по минеральным фазам представлены в табл. 2.

Из таблицы следует, что минеральный состав обеих проб одинаков, различны соотношения между минералами.

В обеих пробах основным рудным минералом является магнетит – 43,9 и 40,6% соответственно пробам 1 и 2.

Второстепенный рудный минерал – гематит (преимущественно мартит), массовая доля которого составляет 1,7 (проба 1) и 2,0% (проба 2). Главный нерудный минерал руды – кварц присутствует в пробах в количестве 37,7 и 38,8%. Второстепенные нерудные минералы силикаты (куммингтонит, щелочные амфиболы, биотит) и карбонаты (кальцит, сидерит) преобладают в пробе 2. Массовая доля силикатов – 11,7 и 11,9; карбонатов – 4,3 и 6,2% соответственно.

Сульфиды железа и апатит являются основными минералами – носителями вредных примесей – серы и фосфора. Количество сульфидов железа (пирита) составляет 0,4 и 0,3; апатита – 0,3 и 0,2% соответственно пробам 1 и 2.

Визуальное и микроскопическое изучение руды обеих проб показало, что руда характеризуется тонко-среднеслоистой текстурой, где мощность слоев изменяется от 0,5 до 7,0 мм, реже отмечаются участки с грубослоистой текстурой, мощность слоев в которых составляет 12-16 мм. Слои были разделены на рудные – 70-90% зерен и агрегатов магнетита, смешанного состава – 40-50% магнетита и нерудные слои, количество магнетита в которых не превышает 10%. Структура руды – тонко-, мелкозернистая.

Таблица 1

Химический состав исходной руды

Наименование пробы	Массовая доля компонентов, %																
	Fe _{общ.}	Fe _{магн.}	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	P ₂ O ₅	S _{общ.}	CO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	ппп	сумма
проба 1	36,8	31,8	18,4	32,1	42,19	0,047	0,99	0,074	1,07	1,87	0,110	0,243	2,38	0,213	0,092	2,90	100,02
проба 2	35,1	29,4	18,0	30,2	44,64	0,037	1,01	0,054	0,60	1,49	0,066	0,175	3,33	0,152	0,100	3,65	100,01

Таблица 2

Минеральный состав исходной руды

Наименование пробы	Массовая доля минералов (М) и связанного с ними железа (Fe), %														
	магнетит		гематит, гидроксиды железа		сульфиды железа		силикаты		карбонаты		кварц	апатит	сумма		
	М	Fe	М	Fe	М	Fe	М	Fe	М	Fe	М	М	М	М	Fe
проба 1	43,9	31,8	1,7	1,2	0,4	0,2	11,7	2,3	4,3	1,3	37,7	0,3	100,0	36,8	
проба 2	40,6	29,4	2,0	1,4	0,3	0,1	11,9	2,4	6,2	1,8	38,8	0,2	100,0	35,1	

В целом, по химико-аналитическим критериям, железистые кварциты пробы 1 относятся к магнетитовым кварцитам, а пробы 2 – к силикат-магнетитовым кварцитам [3, 5].

Магнетит в рудных, смешанных и нерудных слоях имеет различную морфологию и особенности срастания с другими рудными и нерудными минералами [4].

Магнетит рудных слоев обеих проб представлен удлиненными вдоль слоистости агрегатами, которые чаще всего имеют неправильную форму и неровные очертания границ срастания с кварцем и силикатами. Размер агрегатов магнетита изменяется от 0,1 до 0,5 мм. Агрегаты магнетита содержат тонкую густую кварцевую вкрапленность, размер включений 0,01-0,02 мм (рис. 1-а). Реже рудные слои сложены зернами магнетита, которые характеризуются изометричной или полигональной формой зерен, размер их изменяется от 0,01 до 0,07 мм, однако преобладают – 0,03-0,06 мм.

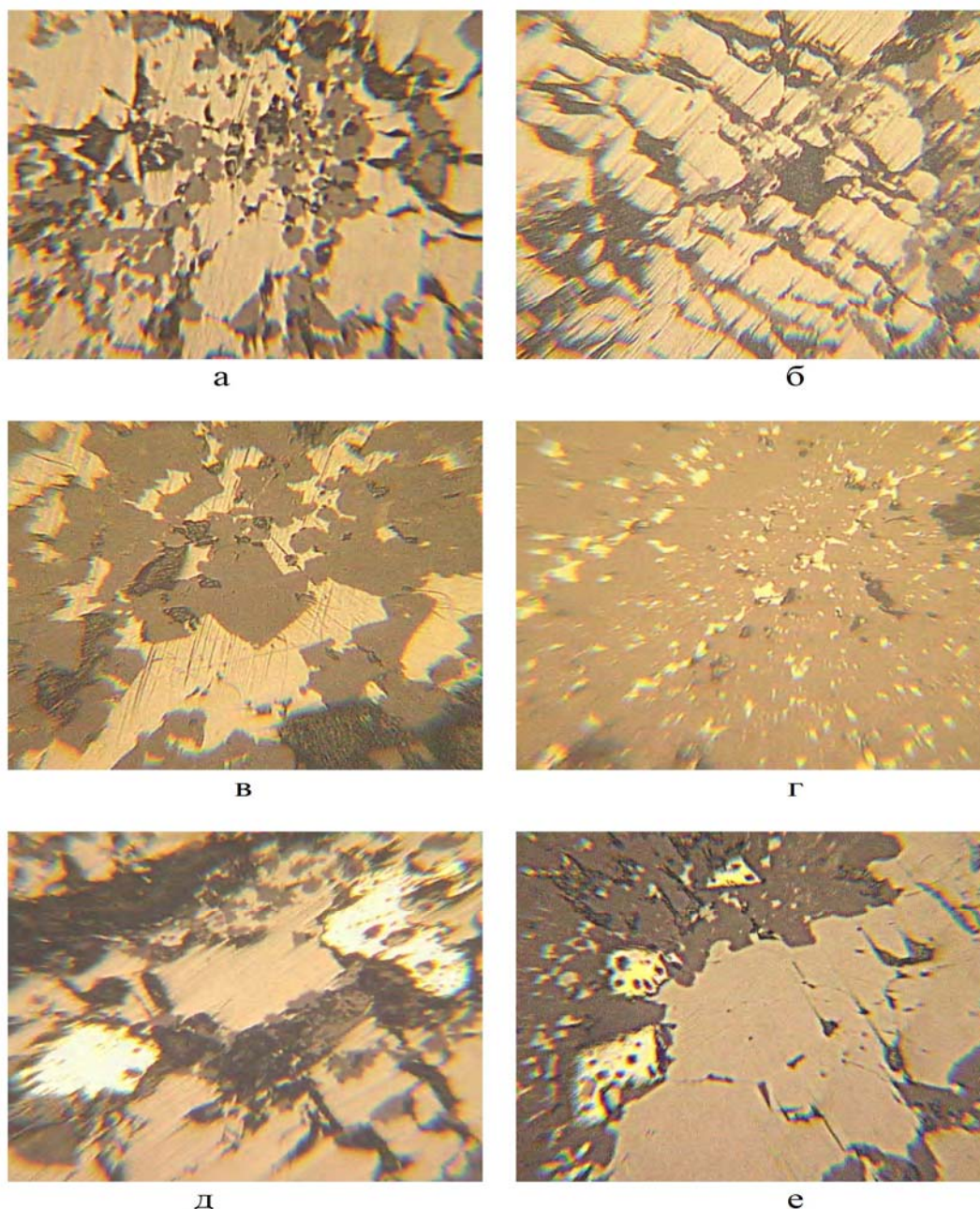


Рис. 1 – Петрографическая характеристика железистых кварцитов.

Отраженный свет, ув. 200^x.

а – тонкая вкрапленность кварца (серое) в магнетитовом слое;

б – развитие трещиноватости по агрегатам магнетита (кремовое) в рудном слое;

в – сложные срастания магнетита с кварцем;

г – тонкая вкрапленность магнетита в нерудном слое;

д – агрегаты мартита (белое), замещающие магнетит в рудном слое;

е – развитие сульфидов железа (желтое) на границе рудного и нерудного слоев.

В значительной степени зерна и агрегаты магнетита пробы 2 разбиты трещинами как поперечной, так и продольной направленности, образованной в результате процесса выветривания горных пород. Трещиноватость придает хрупкость руде и оказывает влияние на ее измельчаемость (рис. 1-б).

Магнетит смешанных слоев представлен зернами и агрегатами удлиненной формы с неровными краями, которые образуют с кварцем и силикатами сложные срастания, что в последствии значительно усложнит их раскрытие при измельчении (рис. 1-в). Размер зерен изменяется от 0,01 до 0,07 мм, агрегатов – 0,1-0,3 мм.

В нерудных слоях магнетит представлен отдельными зернами изометричной формы, размер которых 0,005-0,010 мм, редко достигает 0,020 мм (рис. 1-г).

Мартит в обеих пробах в рудных слоях отмечается в виде единичных зерен и агрегатов совместно с магнетитом. Зерна мартита имеют пористую структуру, неровные, часто извилистые и рваные края, иногда повторяют форму и размеры магнетита (рис.1-д). Размер зерен мартита 0,03-0,05 мм, агрегатов – 0,1-0,3 мм. В преобладающем количестве мартит содержится в виде тонкой вкрапленности в нерудных кварцевых слоях, совместно с тонкой магнетитовой вкрапленностью, окрашивая кварцевые слои в красный цвет (рис. 1-г).

Гидроксиды железа (гетит, гидрогетит, лимонит) присутствуют в небольшом количестве в материале пробы 2, преимущественно в виде пленок, каемок и тонких прожилок.

Сульфиды железа представлены пиритом и отмечаются как в магнетитовых, так и в кварцевых слоях, а так же на границах слоев в виде идиоморфных зерен или зерен изометричной формы. Их размер изменяется от 0,02 до 0,10 мм (рис. 1-е).

Кварц – основной нерудный минерал, который присутствует во всех типах выделенных слоев. В рудных слоях преимущественно представлен в виде вкраплений в магнетитовых зернах и агрегатах. Размер кварцевых включений – 0,005-0,020 мм, редко достигает 0,030 мм (рис.1-а, б). В смешанных слоях, кварц совместно с силикатами заполняет пространство между рудными зернами и агрегатами. Часто, как в рудных, так и в нерудных слоях, зерна кварца содержат включения магнетита, размер которых – 0,010-0,030 мм (рис. 1-а, г). Индивиды кварца имеют неправильную форму с неровными границами, агрегаты – вытянуты вдоль слоистости. Размер зерен кварца изменяется от 0,02 до 0,07 мм, агрегатов 0,15-0,5 мм.

Куммингтонит наиболее распространенный после кварца силикат. Так же, как и кварц, образует тесные срастания с магнетитом. Форма зерен куммингтонита игольчатая, а размер зерен изменяется от 0,01×0,15 до 0,05×0,6мм, преобладают зерна крупностью 0,03×0,4 мм. Под влиянием процессов выветривания куммингтонит из нерудных минералов наиболее претерпел изменения, как внешнего характера, так и химического состава. Внешние изменения проявляются в обесцвечивании минерала до светло-желтого цвета, химические – в частичной потере двухвалентного железа. Выветренный куммингтонит характерен для пробы 2.

Щелочные амфиболы в незначительном количестве присутствуют в руде обеих проб и представлены призматическими индивидами и агрегатами. Размер зерен щелочных амфиболов изменяется от 0,01×0,06 до 0,05×0,045 мм.

Биотит, как и щелочные амфиболы, отмечается в руде редко, находится в срастании с куммингтонитом и приурочен преимущественно к нерудным слоям. Форма зерен биотита – толстотаблитчатая, а размер – 0,2×0,35-0,3×0,5 мм. В зернах биотита отмечается мелкая магнетитовая вкрапленность, размер которой не превышает 0,01 мм.

Карбонаты (кальцит, сидерит) в обеих пробах присутствуют в виде жил заполнения трещин.

Апатит отмечается в срастании с кварцем и куммингтонитом, практически не образует срастаний с магнетитом. Форма зерен апатита – короткопризматическая, размер зерен колеблется от 0,03×0,06 до 0,05×0,1, преобладают зерна размером 0,03×0,06 мм.

После измельчения до крупности 3,0 мм, руда обеих проб подверглась минералогическому анализу на предмет раскрытия минеральных зерен. При этом выделялись раскрытые рудные и раскрытые нерудные зерна, а также их сростки с различным содержанием рудной фазы (р.ф.) – богатые (р.ф. 75-95%), бедные (р.ф. 5-25%) и сростки, состоящие приблизительно на 50% из рудной и 50% из нерудной фазы. Оценка раскрытия минералов проводилась по узким классам крупности. Полученные данные по обеим пробам приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Гранулометрическая характеристика, раскрытие минеральных зерен и распределение железа по классам крупности в исходной руде пробы 1

Классы крупности, мм	Выход %	Массовая доля, %		Массовая доля минеральных компонентов, %											
		Fe _{общ.}	Fe _{Магн.}	Рудные зерна		Сростки с р.ф. 75-95%		Сростки с р.ф. ок. 50%		Сростки с р.ф. 5-25%		Нерудные зерна		Сумма	
				от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.
-3+1	47,0	36,4	31,7	-	28,7	13,49	27,4	12,88	38,4	18,04	5,5	2,59	100,0	47,0	
-1+0,5	24,5	35,1	30,2	-	25,0	6,13	29,4	7,20	39,2	9,60	6,4	1,57	100,0	24,5	
-0,5+0,25	9,0	34,9	29,9	0,6	25,7	2,31	26,3	2,37	37,7	3,40	9,7	0,87	100,0	9,0	
-0,25+0,16	2,5	36,6	30,5	3,5	24,6	0,62	25,3	0,63	34,5	0,86	12,1	0,30	100,0	2,5	
-0,16+0,125	2,6	38,2	32,9	7,3	27,2	0,71	20,5	0,53	31,5	0,82	13,5	0,35	100,0	2,6	
-0,125+0,074	3,1	42,7	38,0	22,7	22,2	0,69	11,6	0,36	27,0	0,84	16,5	0,51	100,0	3,1	
-0,074+0,056	1,4	47,7	43,1	38,3	14,8	0,21	10,3	0,14	18,6	0,26	18,0	0,25	100,0	1,4	
-0,056+0,044	1,4	49,8	45,2	40,7	16,4	0,23	7,2	0,10	17,3	0,24	18,4	0,26	100,0	1,4	
-0,044	8,5	39,3	32,3	41,5	1,5	0,13	2,5	0,21	3,5	0,30	51,0	4,33	100,0	8,5	
итого:	100,0	36,8	31,8	5,7	24,5	24,4	34,4	11,0						100,0	

Таблица 4

Гранулометрическая характеристика, раскрытие минеральных зерен и распределение железа по классам крупности в исходной руде пробы 2

Классы крупности, мм	Выход, %	Массовая доля, %		Массовая доля минеральных компонентов, %											
		Fe _{общ.}	Fe _{магн.}	Рудные зерна		Сростки с р.ф. 75-95%		Сростки с р.ф. ок. 50%		Сростки с р.ф. 5-25%		Нерудные зерна		Сумма	
				от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.	от клас.	от исх.
-3+1	38,0	33,6	29,1	-	-	74,2	28,20	20,8	7,90	5,0	1,90	100,0	38,0		
-1+0,5	25,9	33,3	27,3	1,1	0,28	63,9	16,55	26,1	6,77	8,0	2,07	100,0	25,9		
-0,5+0,25	10,6	32,7	26,7	1,2	0,13	52,3	5,54	25,3	2,68	14,5	1,54	100,0	10,6		
-0,25+0,16	2,9	33,1	25,8	1,5	0,04	27,0	0,77	37,8	1,09	16,2	0,49	100,0	2,9		
-0,16+0,125	2,9	34,4	27,6	6,5	0,19	28,5	0,83	30,1	0,87	19,7	0,57	100,0	2,9		
-0,125+0,074	3,7	40,8	34,8	18,0	0,67	10,8	0,40	35,1	1,29	14,5	0,54	100,0	3,7		
-0,074+0,056	1,9	46,2	40,2	32,2	0,61	6,2	0,12	26,2	0,50	17,3	0,33	100,0	1,9		
-0,056+0,044	1,9	50,2	44,1	49,0	0,94	1,2	0,02	16,5	0,31	23,9	0,45	100,0	1,9		
-0,044	12,2	40,2	32,7	42,0	5,12	2,3	0,28	2,5	0,30	51,2	6,26	100,0	12,2		
итого:	100,0	35,1	29,4		8,0		52,6		21,7		14,2		100,0		

По результатам оценки видно, что в обеих пробах с уменьшением крупности количество раскрытых рудных и нерудных зерен постепенно увеличивается, а количество сростков уменьшается. В целом, процесс раскрытия материала пробы 2 проходит лучше, чем пробы 1: массовая доля раскрытых зерен в первой пробе составила 16,7, во второй – 22,2%, а сростков с разным содержанием рудной фазы (от 10 до 95%) – 83,3 и 77,8%, соответственно. Причем, в первой пробе преобладающими являются сростки, с содержанием рудного компонента 5-25%, а во второй преобладают более богатые сростки, с рудной фазой около 50%. Очевидно, на процесс раскрытия повлияла высокая степень трещиноватости пробы 2, возникшая в результате процессов выветривания. Раскрытие рудных и нерудных зерен пробы 1 начинается в крупности -0,056 мм, пробы 2 – в крупности -0,074 мм, но полное раскрытие возможно лишь в крупности менее 0,010 мм.

Результаты определений физических и физико-механических свойств показали, что пробы существенно отличаются между собой по прочности и пористости [1, 2]. Так, показатели дробимости первой пробы составили в среднем 82,06, второй – 61,9%; крепости по шкале Протодяконова – 9,0 и 5,0 балла; удельная работа разрушения – 88,5 и 43,18 МДж/м³; пористость – 9,6 и 12,2%, соответственно первой и второй пробам. Показатели плотности, угла внешнего трения и естественного откоса обеих проб близки (табл.5).

Таблица 5

Результаты определения физических и физико-механических свойств проб руды

Наименование проб	Прочностные характеристики			Плотность, кг/м ³ ·10 ³				Угол внешнего трения, град				Угол естественного откоса, град от + до (средняя)	Пористость, %
	дробимость, % от ÷ до (средняя)	крепость, балл от ÷ до (средняя)	уд. работа разрушения, МДж/м ³ от ÷ до (средняя)	истинная	кажущаяся	насыпная		по бетону	по резине	по стали	по полистиролу		
						без уплотнения	с уплотнением						
проба 1	74,8÷90,4 (82,06)	7,9÷12,3 (9,0)	60,0÷137,0 (88,5)	3,43	3,13	1,79	1,97	41-42	31-32	28-29	28-28	31÷40 (36,7)	9,6
проба 2	54,7÷64,6 (61,9)	5,0÷6,1 (5,0)	37,5÷50,0 (43,18)	3,42	3,01	1,71	1,93	36-37	31-32	30-30	28-28	33÷40 (37,8)	12,2

ВЫВОДЫ:

1. Исследованные пробы железистых кварцитов близки по химическому составу. Массовая доля Fe_{общ.} 36,8 (проба 1) и 35,1 (проба 2); Fe_{магн.} – 31,8-29,4; FeO – 18,4-18,0; Fe₂O₃ – 32,1-30,2%, соответственно. Содержание кремнезема (SiO₂) в обеих пробах – 42,19 и 44,64, глинозема (Al₂O₃) – 0,99 и 1,01%. Массовая доля CaO в пробе 1 – 1,07; MgO – 1,87; CO₂ – 2,38; в пробе 2 – 0,60; 1,49 и 3,33 соответственно. Остальные окислы в обеих пробах не превышают десятых долей процента. Вредные примеси – фосфор и сера составляют в пробе 1 – 0,05 (P) и 0,243 (S); в пробе 2 – 0,03 и 0,175% соответственно.

2. Обе пробы близки по минеральному составу. Основным рудным минералом обеих проб является магнетит, массовая доля которого составляет 43,9 и 40,6% соответственно пробам 1 и 2. Второстепенный рудный минерал – гематит (мартит), присутствует в небольших количествах – 1,7 (проба 1) и 2,0% (проба 2). Главный нерудный минерал руды – кварц, массовая доля которого – 37,7 и 38,8%. Второстепенные нерудные минералы силикаты (куммингтонит, щелочные амфиболы, биотит) и карбонаты (кальцит, сидерит) преобладают в пробе 2: силикаты составляют 11,7 и 11,9; карбонаты – 4,3 и 6,2% соответственно. Количество основных минералов – носителей вредных примесей – серы и фосфора невелико. Массовая доля сульфидов железа (пирита) – 0,4 и 0,3; апатита – 0,3 и 0,2% соответственно пробам 1 и 2.

3. Железистые кварциты обеих проб характеризуется тонко-среднеслоистой текстурой. По размеру рудных выделений – тонковкрапленные. Зачастую, рудные и нерудные минералы образуют сложные структуры срастания: неравнозернистую, тесного срастания (проба 1, 2) и дробления (проба 2). Для некоторых рудных и смешанных слоев характерно наличие нерудных включений кварца и силикатов в магнетите, и наоборот, наличие мелких вкраплений магнетита в кварце и силикатах.

4. С уменьшением крупности материала исследованных проб, количество раскрытых рудных и нерудных зерен постепенно увеличивается, а количество сростков уменьшается. В целом, процесс раскрытия материала пробы 2 проходит лучше, чем пробы 1. Очевидно, на процесс раскрытия повлияла высокая степень трещиноватости пробы 2, образовавшаяся в результате процессов выветривания. Раскрытие рудных и нерудных зерен пробы 1 начинается в крупности - 0,056 мм, пробы 2 – в крупности -0,074 мм, но полное раскрытие возможно лишь в крупности менее 0,010 мм.

5. Результаты определений физических и физико-механических свойств показали, что пробы существенно отличаются между собой по прочности и пористости. Так, показатели дробимости первой пробы составили в среднем 82,06, второй – 61,9%; крепости – 9,0 и 5,0 балла; удельная работа разрушения – 88,5-43,18 МДж/м³; пористость – 9,6-12,2%, соответственно. Показатели плотности, угла внешнего трения и естественного откоса двух проб близки.

6. Исходя из результатов исследования минералогических характеристик обеих проб руды Еристовского месторождения, для получения высококачественных концентратов, рекомендуется разработка магнитно-флотационной схемы обогащения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Грег С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость.-М.: Мир, 1970. – 407 с.
2. Доценко В.Д. Использование удельной поверхности для решения геологических задач. Перспективы развития богатых железных руд Криворожского бассейна на глубину. -К: Наукова думка, 1975. – С. 103-108.
3. Пирогов Б.И. Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов -М.: Недра, 1969. – 240 с.
4. Рамдор П. Рудные минералы и их срастания - М.: Изд. иностранной литературы, 1962. – 1132 с.
5. Ревнивцев В.И. Роль технологической минералогии в обогащении полезных ископаемых // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1982. – №4. – С. 443-449.