

УДК 622.357.4

**И.В. Велесевич, В.А. Винников, М.Г. Зильбершмидт,  
Е.И. Терещенко**

## **ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ СЛОЖНОГО СОСТАВА**

*Представлены результаты исследования особенностей строения и структурного состояния железистых кварцитов сложного состава Лебединского месторождения. Описаны характерные морфологические признаки присутствия основных рудообразующих минералов в кварцитах основных минералого-технологических типов. Приведены значения параметров, характеризующих структурное состояние магнетита и кварца. Установлены диапазоны изменчивости относительного содержания минералов в основных разновидностях кварцитов и выявлены минеральные формы и характер присутствия в них серы.*

*Ключевые слова: железистые кварциты, мономинеральные концентраты, магнетит и гематит, структурное состояние.*

---

Эффективность технологических приемов получения качественных мономинеральных концентратов из железистых кварцитов, как и любого другого вида рудного минерального сырья, в значительной степени зависит от особенностей их состава и строения, определяющих формы, размеры, концентрацию и распределение в полиминеральном агрегате слагающих его компонентов. Знание таких особенностей приобретают особую актуальность при разработке месторождений, рудная толща которых сформирована несколькими разновидностями полиминеральных комплексов, технологические свойства которых отличаются друг от друга в пределах обрабатываемого массива.

Железистые кварциты Лебединского месторождения имеют специфическую изменчивость содержания основных образующих минералов [1]. В основном они сложены кварцем и

оксидами железа. Основные породообразующие минералы группы силикатов железистых кварцитов этого месторождения представлены: **моноклинными амфиболами**: куммингтонитом, актинолитом, тремолитом, грюнеритом; **щелочными амфиболами**: рибекитом, глаукофаном; **ромбическим амфиболом**: антофиллитом. Помимо этого в полиминеральном агрегате кварцита могут присутствовать **слюды**: биотит, мусковит, зеленая слюда и **карбонаты**: анкерит, сидерит, кальцит, доломит. К акцессорным минералам относятся: пирит, пирротин, гетит, апатит, тальк, лепидокрокит, минералы группы хлоритов. К железистым кварцитам сложного состава можно отнести разновидности в которых кварц в значительной степени замещается амфиболами, слюдами, карбонатами и др.

Общая информация о составе железистых кварцитов к сожалению не

позволяет делать надежные выводы об их технологических свойствах. Это связано с тем, эти свойства в большинстве случаев являются структурночувствительными. То есть они в значительной мере зависят от характера присутствия тех или иных минералов в полиминеральном агрегате.

Исследование особенностей состава, строения и структурного состояния минерального вещества железистых кварцитов сложного осуществлялось с применением комплексного методического подхода, использующего для повышения информативности возможности нескольких методов анализа минерального вещества, данные которых позволяют не только подтверждать, но и взаимно дополнять друг друга. Комплексность подхода заключается в использовании компьютеризированной оптической микроскопии, рентгеновских дифрактометрии и флуоресцентного анализа, а также, химического анализа.

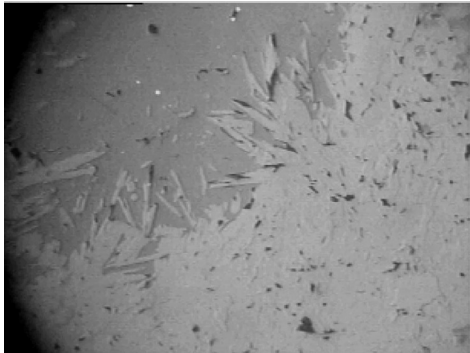
Выполненные исследования позволили выявить характерные особенности присутствия силикатов и серосодержащих минералов в железистых кварцитах. Было установлено, что *куммингтонит* встречается в виде самостоятельных зерен шестоватой, призматической, игольчатой формы длиной от 0,01 до 0,8 и более мм. Его лучистые, сноповидные и хаотические «волокнистые» агрегаты часто содержат вкрапления других минералов. Наряду с кварцем он является одним из основных минералов, слагающих силикатные слои. *Куммингтонит* в качестве включений может присутствовать в зернах магнетита, гематита и пирита. Наибольшее содержание *куммингтонита* отмечено в магнетит-куммингтонитовых и *куммингтонит-магнетитовых* разновидностях руд, в которых его количество варьирует в пределах от 10 до 35 %, в среднем от 15 до 25 %.

Формы сростания с магнетитом и гематитом разнообразны. Наиболее часто встречаемые внешние сростания по границе зерен. Границы сростания с магнетитом, как правило, неровные, извилистые и, в большинстве своем, плотные, ненарушенные, а с торцевыми участками кристаллов *куммингтонита* магнетит имеет зазубренные, ступенчатые границы и часто трещиноватые, с выколловшимися фрагментами. Реже *куммингтонит* образует вкрапления тонких зерен (0,005-0,05 мм) в магнетите и гематите, значительно ухудшая технологические качества рудных минералов, заполняет трещины в рекристаллизованном магнетите.

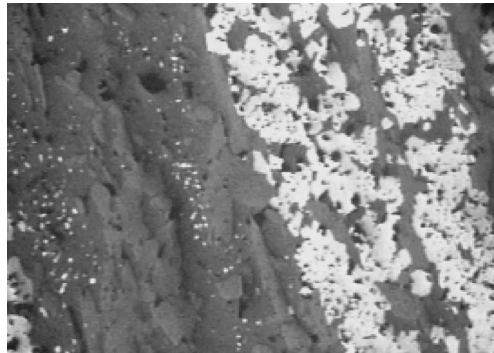
Характерные особенности *куммингтонита*, содержащегося в исследуемых образцах железистых кварцитов *Лебединского ГОКа*, иллюстрируют фотографии, представленные на рис. 1-2.

*Актинолит*, образует вытянутые, игольчатые и нитевидные кристаллы, собранные в радиально-лучистые, спутано-волокнистые агрегаты зеленых оттенков. Характерны четкие границы сростания в агрегатах, выколловшиеся участки игольчатых окончаний кристаллов на стыке с другими минералами. Размеры зерен в пределах от 0,01 до 1,5 мм. В *актинолит-магнетитовых* кварцитах формирует самостоятельные слои и прослойки, является одним из основных минералов, слагающих кварц-силикатные слои. Присутствует *актинолит* в виде тонких включений в магнетитовых индивидах (см. рис. 3). В железистых кварцитах *ЛГОКа* в среднем содержится от 7 до 12 % *актинолита*.

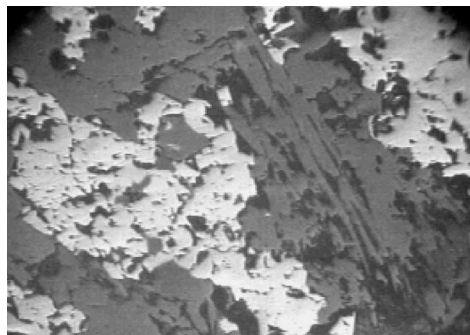
*Тремолит* по кристаллической структуре и многим физическим свойствам аналогичен *актинолиту*. Форма и размеры зерен аналогичны *актинолиту* (см. рис. 4).



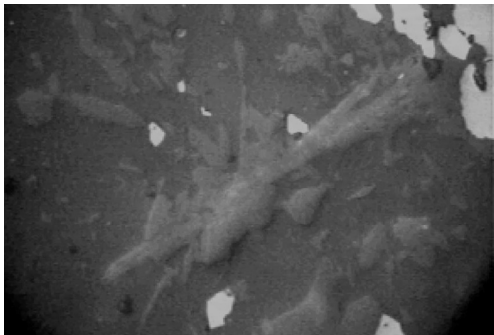
**Рис. 1.** Ув. 12,5х8х10. Куммингтонитовый слой на границе с кварцем



**Рис. 2.** 6,3х8х10. Магнетитовый слой в контакте с кварц-куммингтонитовым слоем. Куммингтонитовые включения в магнетите



**Рис. 3.** Ув. 12,5х10х10. Агрегат магнетита в сростании с актинолитом



**Рис. 4.** 25х8х10. Агрегат игольчатого тремолита

Так же образует лучистые, волокнистые агрегаты, участвует в формировании силикатных слоев.

*Антофиллит* – ромбический амфибол, по составу близок куммингтониту. Обладает спайностью по призме. Кристаллы имеют призматический, столбчатый облик. Образует спутано-волокнистые массы, иногда в сростании с кварцем. С рудными минералами имеет более плотные границы и менее нарушенные, чем в случае с актинолитом и куммингтонитом (см. рис. 5). Кристаллы удлиненно-призматического габитуса.

Грюнерит – моноклинный амфибол с кристаллической структурой,

аналогичной структуре тремолита. Спайность по призме совершенная. Кристаллы удлиненно-призматического габитуса. Часто образуют волокнистые массы. Характерны полисинтетические двойники. В железистых кварцитах часто соседствует с куммингтонитом, тремолитом или замещает их. Встречается реже описанных выше амфиболов.

*Щелочные амфиболы* имеют ограниченное распространение в изученных образцах и представлены, в основном, *рибекитом* и *глаукофаном*.

Кристаллы имеют игольчатую, столбчатую и призматическую форму. Размеры зерен могут варьировать от

0,01 до 1,5 мм. Нередко образуют волокнистые агрегаты. Часто вкраплены в кварц. Межзеренные границы с магнетитом имеют ступенчатый, извилистый рельеф. Бывают трещины по контакту зерен с рудными минералами.

Наиболее часто встречаемые слюды в изученных железистых кварцитах: биотит и зеленая слюда.

*Биотит.* Облик кристаллов таблитчатый, гексагональный. Из-за относительно невысокой твердости зерна биотита в аншлифах имеют более низкий рельеф по сравнению с другими силикатами. Спайность совершенная. В кварц-силикатных слоях присутствует в виде тонких листоватых чешуек размером от 0,01 до 1,2 мм или ксеноморфных агрегатов величиной до 2,0 и более мм. Иногда образует тонкие слои или прожилки. Встречается в качестве тонких пойкилитовых включений 0,005 мм и более в магнетите (см. рис. 5–6).

*Зеленая слюда (саладонит)* близка по кристаллографическим и морфологическим свойствам биотиту. Характерным отличием являются зеленые оттенки индивидов. Так же, как и биотит присутствует в виде удлиненных или ксеноморфных зерен, образует скопления и слойки различной величины, содержится в виде вкраплений в магнетите. Индивиды биотита и зеленой слюды чаще ориентированы вдоль слоистости, реже под углом и произвольно. С магнетитом образуют различные типы сростаний: от субидиоморфных до мирмекитоподобных.

Наибольшее содержание слюд отмечено в куммингтонит-магнетитовых разновидностях руд и варьирует в пределах от 10 до 30 %. Присутствуют практически во всех представленных типах руд.

Преобладающим минералом группы карбонатов в изученных железистых кварцитах является анкерит. Си-

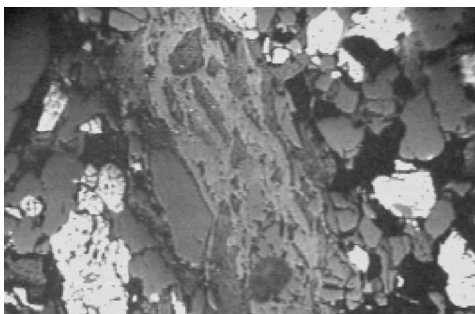
дерит, доломит и кальцит встречаются значительно реже.

Индивиды карбонатов имеют различный облик: от ромбовидных до ксеноморфных. Могут образовывать агрегаты, зернистые массы, прослойки. В зернах наблюдаются полисинтетические двойники. Спайность совершенная по ромбоэдру. Границы с магнетитом преимущественно ломаные, извилистые, малодефектные. С кварцем карбонаты образуют мирмекитоподобные сростания с четкими, рельефными границами (см. рис. 7–8). Сидерит чаще наблюдается в виде прожилков в агрегатах кварца. Совместно с амфиболами и слюдами составляют силикатные слои.

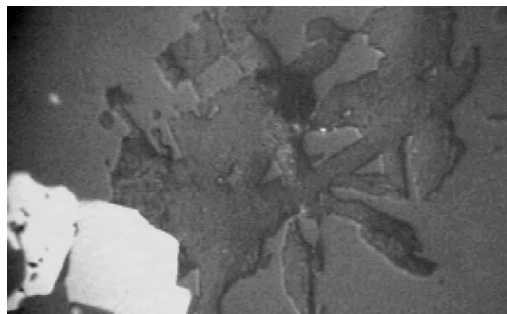
Серосодержащие минералы железистых кварцитов ЛГОКа – пирит и пирротин в той или иной степени содержатся практически во всех типах руд. Однако, наибольшее количество сульфидов отмечено в биотит-магнетитовой разновидности, причем относительное содержание серосодержащих минералов варьирует от нескольких сотых долей до 2–4 %.

Сульфиды в исследованных образцах представлены в основном пиритом. Размеры пиритовых образований изменяются в пределах от 0,005 до 3 – 5 мм. Большинство пиритовых зерен имеют размеры в диапазоне от 0,05 до 0,4 мм. Довольно часты пиритовые агрегаты размером до 1,5 мм.

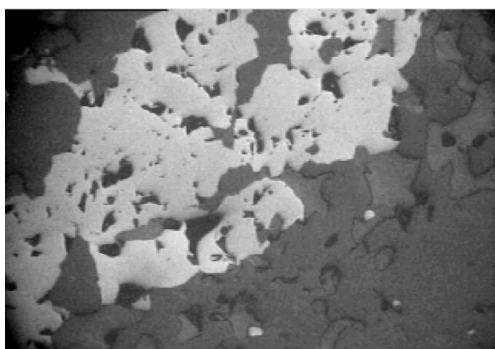
Формы выделений пирита весьма разнообразны: от округлых, изометричных, идиоморфных зерен с хорошо образованными гранями (это, как правило, более мелкие индивиды от 0,005 до 0,1 мм) до игольчатых, вытянутых искривленных, коррозионных, скелетных, а так же структур замещения по магнетиту, сидериту, силикатам. В этом случае границы сростания с контактирующими минералами могут быть глубоко взаимопр-



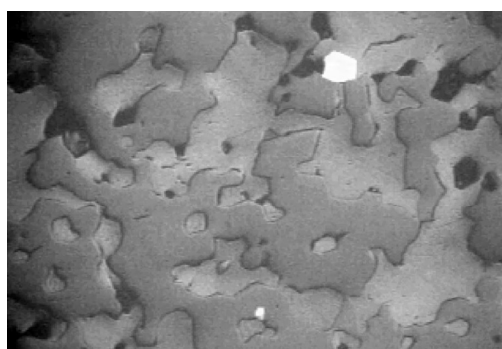
**Рис. 5.** Ув. 12,5х8х10. Прожилоч антофиллита с игольчато-шестоватыми включениями слюды (биотита)



**Рис. 6.** Ув. 25х8х10. Агрегат биотита в сростке с магнетитом в кварце



**Рис. 7.** Ув.12,5х8х10. Срастания анкерита с кварцем и магнетитом



**Рис. 8.** Ув. 12,5х8х10. Мирмекитоподобные срастания анкерита с кварцем

никающими, остроугольными, сильно извилистыми. Распределение зерен пирита в нерудной составляющей произвольное, не имеющее преимущественной направленности относительно слоистости. Часть пирита находится в срастании с магнетитом, образуя внутренние и внешние срастания, при этом границы срастания часто имеют сложный характер. Другая часть рассеяна по кварц-силикат-ным слоям. В некоторых образцах пирит размещается по границам контакта вокруг зерен силикатов.

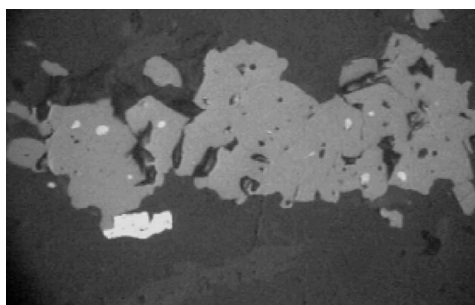
Небольшая часть зерен пирита содержит мелкие включения магнетита и пирротина.

Контакты между зернами пирита с магнетитом чаще не нарушены, но в

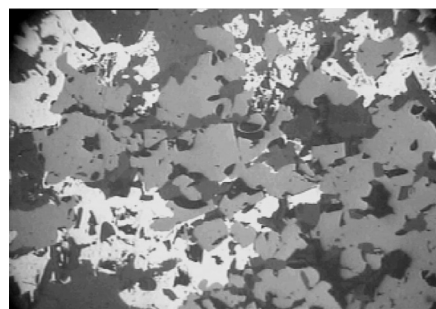
некоторых случаях четкий черный контур можно рассматривать как нарушение сплошности пограничного пространства.

Основное количество пирротина сосредоточено в виде пойкилитовых включений размером 0,001-0,05 мм внутри магнетитовых индивидов. Меньшая часть образует внешние срастания с магнетитом и пиритом. Редко наблюдаются самостоятельные зерна неправильных форм и агрегаты размером от 0,005 до 0,5 мм (см. рис. 9-10).

Выполненные исследования показали, что силикатные минералы в исследованных разновидностях железистых кварцитов представлены



**Рис. 9.** Ув. 25х10х10. Внутренние и внешние сростания сульфидов с магнетитом



**Рис. 10.** Ув. 12,5х8х10. Формы сростания магнетита с пиритом

различными амфиболами (моноклинным и ромбическим), слюдами, моноклинными пироксенами (например, эгирин). Кроме них в кварцитах присутствуют карбонаты. В связи с этим можно прогнозировать рост средней плотности нерудной фракции за счет того, что плотность амфиболов выше плотности кварца. Кроме того, достаточно высокая их твердость (не меньшая чем у кварца) и наличие у них совершенной спайности должно вызывать образование при дезинтеграции вытянутых (столбчатых) минеральных частиц куммингтонита, актинолита и других амфиболов. Слои «зеленых слюд» в кварцитах часто представлены не окрашенными в зеленый цвет разновидностями слюд (типа селадонита), а агрегатами эгирина.

Исследования показали, что доля пирротина в общем объеме сульфидов железа составляет не более 10–15 %. Следует отметить, что в процессе изучения представленных образцов не отмечен факт преобладания сульфидов в рудных или нерудных агрегатах. Их присутствие наблюдается с примерно одинаковой вероятностью в обоих составляющих. Это свидетельствует о том, что содержание серы в руде не способно однозначно определять её количество в концентрате.

Проведенные исследования показали, что морфологические структуры железистых кварцитов несколько различаются в зависимости от их минерально-технологических типов. Некоторые различия наблюдаются и в строении рудных, смешанных и безрудных слоев. Магнетитовые кварциты на месторождении составляют около 50 % продуктивной толщи. Главными минералами в них являются магнетит (до 47 %) и кварц (около 33 %) (см. табл. 1). В небольших количествах (менее 10 %) присутствуют щелочные амфиболы, доломит, актинолит, тальк и эгирин.

Куммингтонито-магнетитовые кварциты развиты преимущественно в нижней железорудной подсвите. Рудный минерал в них представлен только магнетитом, нерудный — кварцем (в среднем около 30 %), куммингтонитом и антофиллитом (в сумме до 20 %); биотитом и зеленой слюдой (до 10 %); карбонаты представлены анкеритом (от 2 до 4 %); иногда присутствуют щелочные амфиболы.

Биотито-магнетитовые кварциты характеризуются наименьшим содержанием магнетита (около 30 %), наибольшим — кварца (35 %). Биотит вместе с зеленой слюдой присутствуют на уровне 13-17 %, содержание куммингтонита

Таблица 1

**Различия минерального состава минерально-технологических разновидностей исследованных образцов железистых кварцитов ЛГОКа**

Минералы	Магнетитовые кварциты	Куммингтонит - магнетитовые кварциты	Биотит — магнетитовые кварциты
Кварц	29,5-34,5	32,2-37	12,5-17,5
Магнетит	34-39	26,6-31,5	30-35
Гематит	1,73-2,0	0,17	-
Все карбонаты	2,6-3,5	8,1-13	2,5-5,0
Все амфиболы	13,5-17,0	18,5-22,5	30-35
Эгирин	0,5 – 2	-	-
Биотит+ зеленая слюда	2,5-4,5	7,6-11,5	9-13,5
Пирит + пирротин	0,23-0,25	0,43-0,52	5-7

Таблица 2

**Значения параметров структурного состояния магнетита и кварца в минеральном агрегате железистых кварцитов Лебединского месторождения различных минералогических типов**

Параметр	Гематит – магнетитовые кварциты		Магнетитовые кварциты		Куммингтонит – магнетитовые кварциты		Биотит – магнетитовые кварциты		Щелочно-силикат-магнетитовые кварциты	
	Магн.	Кв.	Магн.	Кв.	Магн.	Кв.	Магн.	Кв.	Магн.	Кв.
$D_M, \text{А}$	625, 6	679	507,4	968,5	530,1	978,8	665,3	-	555,9	951,3
$\rho_d \cdot 10^6, \text{А}^{-2}$	10,9	6,6	14	6,12	10,3	10	10,6	-	13	4,1
$\rho_e \cdot 10^6, \text{А}^{-2}$	5	2,04	6,1	1,59	4,7	2,05	4,8	-	19	1,61
$\sigma_D, \text{ГПа}$	0,409	0,88	0,46	0,47	0,39	0,81	0,407	-	0,44	0,65
$\sigma_e, \text{ГПа}$	0,036	0,005	0,0142	0,006	0,03	0,007	0,034	-	0,12	0,069
$\sigma^s, \text{ГПа}$	-1,5	0,113	-1,23	0,102	-1,27	0,157	-1,23	-	-1,11	0,101

составляет около 8 %. Из второстепенных минералов развиты анкерит, щелочные амфиболы. Заметно присутствие сульфидов железа, содержание и форма присутствия которых варьирует в значительных пределах.

Помимо особенностей состава и строения железистых кварцитов на их поведение в процессах добычи и переработки должно оказывать структурное состояние минерального агрегата. Впервые понятие о структурном состоянии горных пород, характеризующем дефектную структуру и систему остаточных напряжений было введено в работах Г.Я. Новика и М.Г. Зильбершмидта [2]. Для количественной оценки

параметров, характеризующих структурное состояние минерального агрегата железистых кварцитов, использовались методы рентгеновской дифрактометрии и оптической микроскопии.

Впервые была выполнена количественная оценка параметров структурного состояния магнетита и кварца, слагающих полиминеральный агрегат железистых кварцитов различных минералогических типов, результаты которой представлены в табл. 2. В ней используются следующие их обозначения:  $D_M$  - размер блока мозаичного строения минерала;  $\rho_d$  - плотность дислокаций на границе блока мозаики;  $\rho_e$  - плотность дислокаций внутри блока мозаики;  $\sigma_D$  - значе-

ние напряжений на границе блока мозаики;  $\sigma_\epsilon$  – значение напряжений внутри блока мозаики;  $\sigma^s$  – величина средних структурных напряжений в минерале.


Результаты показали, что параметры структурного состояния зерен кварца и магнетита в кварцитах различного минералогического типа несколько отличаются, что должно проявляться в различии их технологических свойств. В частности, высокая плотность дислокаций внутри блоков мозаики в зернах магнетита щелочно-силикат-магнетитовых кварцитов может вызвать его высокую остаточную намагниченность, что способно негативно сказаться на эффективности магнитной сепарации. Относительно небольшая величина размера блоков мозаики зерен кварца в гематит-магнетитовых кварцитах свидетельствует о высокой величине в них остаточных структурных напряжений, что может повлиять на эффективность дезинтеграции всего агрегата. Необходимо отметить, что полученные данные подтвердили разнозначность напряженных состояний зерен магнетита и кварца в минеральном агрегате кварцитов, о чем свидетельствуют значения параметра  $\sigma^s$ , представленного в табл. 2.

Таким образом, железистые кварциты сложного состава Лебединского месторождения характеризуются значительной изменчивостью минерального состава, строения и структурного состояния. В частности, в куммингтонит-магнетитовых разновидностях железистых кварцитов наблюдается наибольшее содержание кварца (до 37 %), минералов группы карбонатов (до 13 %). Для биотит-магнетитовой разновидности характерно наибольшее содержание амфиболов (до 35 %), слюд (до 14 %), сульфидов (до 7 %) и наименьшее количество магнетита (до 31,5 %) и гематита. Серосодержащие минералы в железистых кварцитах с одинаковой долей вероятности представлены как в рудной, так и нерудной составляющей, причем, сульфиды представлены в основном пиритом.

Следует заметить, что при замещении кварца амфиболами, слюдами и карбонатами должно происходить изменение физико-технических свойств кварцитов. Это обстоятельство целесообразно учитывать при вовлечении в переработку биотит – магнетитовых и куммингтонит – магнетитовых разновидностей и обосновании технологических схем их ресурсосберегающей переработки.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голивкин Н.И., Кононов Н.Д., Орлов В.П., Романов И.И., Соколов Н.А., Фоминов Ю.М., Шевырев И.А. Железные руды КМА. Изд. Геоинформмарк. М. 2001, 616 с.
2. Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. Управление свойствами пород в процессах горного производства, М., УРСС, 2010, 224 с. 

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Велесевич Ираида Васильевна* – старший научный сотрудник, специалист в области исследования горных пород и помощью методов оптической микроскопии,  
*Винников Владимир Алексеевич* – профессор,  
*Зильбершмидт Михаил Григорьевич* – профессор,  
*Терещенко Евгения Ивановна* – аспирант,  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru