



# НАУКИ О ЗЕМЛЕ SCIENCES OF EARTH

УДК 622.7

## ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЗМА ЗАКРЕПЛЕНИЯ СУБМИКРОННЫХ ЧАСТИЦ КВАРЦА НА ПОВЕРХНОСТИ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ ДЖЕСПИЛИТОВ

## RESEARCH ON THE CONSOLIDATION OF SUBMICRON PARTICLES OF QUARTZ ON THE SURFACE OF ORE MINERALS JASPILITES

С.Р. Гзогян

S.R. Gzogyan

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: gzogyan@bsu.edu.ru

### Аннотация

В работе рассмотрен вопрос взаимодействия природных мономинеральных фракций рудных минералов (оксидов железа) джеспилитов КМА и субмикронных частиц кварца при их совместном сухом и мокром измельчении. Установлен механизм их взаимодействия при совместном измельчении. Прочность закрепления и удержания субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов оценивалась механической оттиркой, ультразвуковой обработкой и центрифугированием. Показано, что закрепление и удержание субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов обусловлено межмолекулярными силами взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса) приведенных в контакт кристаллических решеток минералов. Величина этих сил зависит от структурно-геометрического соответствия контактирующих минералов. Установлено прочное закрепление и удержание на поверхности частиц рудных минералов субмикронных частиц кварца, максимальный размер которых менее 0.8 мкм, в результате происходит образование «техногенных сростков». Это снижает эффективность раскрытия минералов, нивелирует разницу в поверхностных свойствах разделяемых минералов.

### Abstract

The paper discusses the question of interaction of natural monomineral fractions of ore minerals (oxides of iron) of jaspilite KMA and sub-micron particle of quartz in their joint dry and wet grinding. The mechanism of their interaction with the joint grinding. The strength of the fastening and retaining of submicron particles of quartz on the surface of ore minerals was estimated mechanical otterrai, ultrasonic treatment and centrifugation. It is shown that the fastening and retaining of submicron particles of quartz on the surface of the ore minerals due to intermolecular interaction forces (van der Waals) that are listed in contact the crystal lattices of minerals. The magnitude of these forces depends on the structural-geometrical conformity of the contacting minerals. Established strong securing and retaining on the surface of the particles of ore minerals of submicron particles of quartz with a maximum size less than 0.8 microns, i.e., the formation of "industrial clusters". This reduces the effectiveness of the disclosure minerals, eliminates the difference in surface properties of the partial minerals.



**Ключевые слова:** джеспилиты, обогащение полезных ископаемых, магнетитовый концентрат, магнетит, мартит, гематит, гетит, кварц, измельчение, субмикронные частицы, оттирка, ультразвуковая обработка, центрифугирование, электронная микроскопия, закрепление и удержание, силы Ван-дер-Ваальса.

**Keywords:** jaspilite, mineral processing, magnetite concentrate, magnetite, martite, hematite, goethite, quartz, crushing, submicron particles, attire, ultrasonic treatment, centrifugation, electron microscopy, fixation and retention, van der Waals forces.

## Введение

Возможное качество магнетитовых концентратов зависит от вещественного состава, структурных особенностей перерабатываемых руд, способов и технологий их переработки, а их металлургическая ценность определяется массовой долей полезных и вредных примесей.

При переработке тонковкрапленных джеспилитов на обогатительных фабриках применяется в основном мокрая магнитная сепарация, которая имеет следующие технологические недостатки, снижающие металлургическую ценность получаемых магнетитовых концентратов:

- захват в магнитную фракцию нерудных частиц и бедных сростков;
- наведение остаточной намагниченности на частицы промпродуктов;
- применение относительно сильных полей для преодоления потенциального барьера частицами магнетита на разделе фаз «жидкость–газ» при выходе магнитного продукта из ванн магнитных сепараторов в воздух. Особенно низка эффективность последних стадий мокрой магнитной сепарации из-за крайне неудовлетворительного разрушения магнитных прядей и флоккул, в которые механически захвачены нерудные частицы и бедные сростки, что сказывается на получении высококачественных продуктов для бездомной металлургии [Гзогян, 2010; Чантурия, Гзогян, 2012; Гзогян, 2011].

Анализ распределения полезных и вредных компонентов в рядовом магнетитовом концентрате показывает довольно заметную концентрацию последних в классе крупности плюс 0.045 мм. В таблице отражен состав магнетитовых концентратов, полученных из джеспилитов КМА, который показывает, что при любом виде измельчения (шаровое или самоизмельчение) не удастся получить чистые от диоксида кремния продукты.

Таблица  
Table

Химический состав магнетитовых концентратов  
Chemical composition of magnetite concentrates

Наименования компонентов	Массовая доля компонента, %			
	ПАО «Михайловский ГОК»	ОАО «Комбинат КМАруда»	ОАО «Стойленский ГОК»	АО «Лебединский ГОК»
<i>Fe</i> общ	65.1	66.0	66.8	68.56
<i>Fe</i> <sub>2</sub> <i>O</i> <sub>3</sub>	64.6	63.5	65.2	65.4
<i>FeO</i>	25.7	28.7	27.4	29.45
<i>SiO</i> <sub>2</sub> общ	8.2	7.1	6.5	4.35
<i>SiO</i> <sub>2</sub> своб	7.35	5.6	5.6	3.7
<i>S</i> общ	0.007	0.032	0.03	0.044
Класс –0.045 мм	90.2	84.7	88.3	96.2

Основной причиной этого считалось наличие тонкой и дисперсной вкрапленности рудных минералов в кварце. Однако, как показывает практика, даже при тонком измельчении джеспилитов, лишенных дисперсной нерудной вкрапленности, в концентрате наблюдаются свободные частицы кварца. Оптико-минералогическим анализом установлено, что частицы рудного минерала во всех классах крупности покрыты шламами и присыпками из нерудных минералов; единичные частицы рудного минерала находятся в них, как в «рубашке» [Гзогян, 2010;

Чантурия, Гзогян, 2012; Гзогян, 2011]. Это позволяет предположить, что загрязнение образующейся поверхности частиц рудных минералов происходит при измельчении.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются природные мономинеральные фракции магнетита (АО «Лебединский ГОК»), гетита, гематита (ПАО «Михайловский ГОК») и мартита (ОАО «Стойленский ГОК») месторождений КМА, а также снежно-белый кварц (стандартный образец СОП КК-2 с массовой долей  $SiO_2$  99.62 и  $Fe_2O_3$  0.012%).

Для изучения механизма закрепления и удержания субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов кварц был измельчен в мельнице RS 200 (Retch, Германия) с агатовой фурнитурой до крупности минус 0.008 мм, при этом содержание частиц класса минус 0.001 мм в нем составило 78.5% (рис. 1). Контроль крупности тонкого измельчения осуществлялся на фотоседиментометре ФСХ-5 (ООО «Фирма Ходакова», Россия).

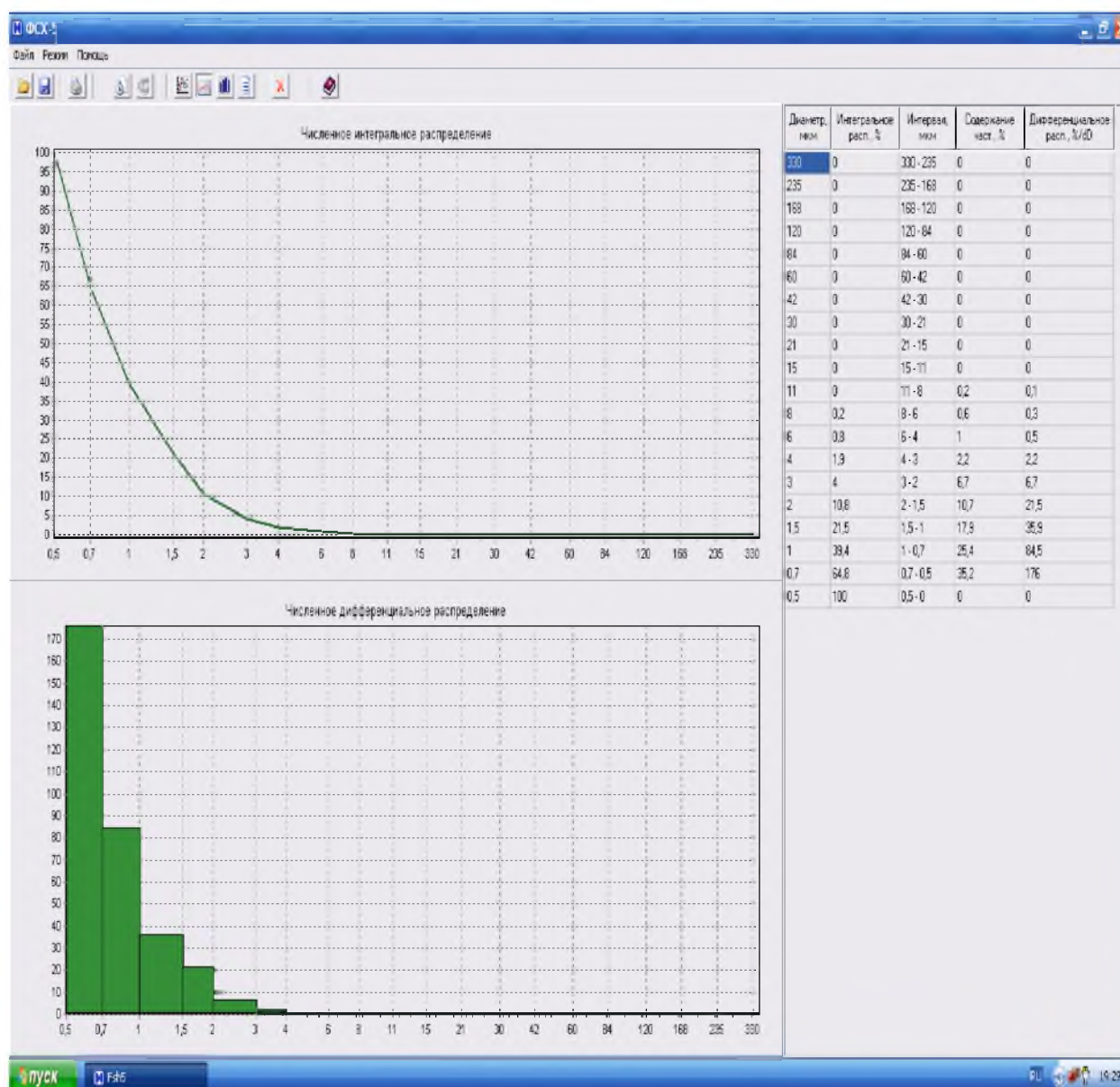


Рис. 1. Интегральное и дифференциальное распределение по размерам субмикронных частиц в кварце  
 Fig. 1. Integral and differential size distribution of submicron particles in quartz

Методы исследования предусматривают изучение механизма закрепления субмикронных частиц кварца на поверхности частиц рудных минералов при их совместном сухом и мокрым измельчении.

Экспериментальные исследования основываются на анализе процесса закрепления и удержания субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов джеспилитов.

### Результаты и их обсуждения

Совместное измельчение как сухим, так и мокрым способом частиц кварца с рудными минералами осуществлялось в мельнице RS 200 (Retch, Германия) с агатовой фурнитурой. Совместное измельчение субмикронных частиц кварца с рудными минералами производилось в соотношении 1:8 по аналогии их соотношения в готовой продукции предприятий КМА.

Электронно-микроскопическое изучение показало, что частицы кварца в большинстве случаев ограничены гладкими, чистыми поверхностями скола, осложненными простыми или сложными ступенями.

Оценка загрязнения поверхности частиц рудных минералов субмикронными частицами кварца производилась по результатам изучения поверхности рудных минералов под электронным микроскопом и результатам их химического анализа. Для оценки прочности закрепления субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов применяли механическую оттирку, ультразвуковую обработку и центрифугирование.

В результате совместного сухого измельчения кварца с магнетитом кварц изменил свой цвет со снежно-белого до серовато-белого, с гематитом – до красноватого, с мартитом – до красновато-буроватого, с гетитом – до желтоватого. Под электронным микроскопом на поверхности частиц рудных минералов наблюдается много субмикронных частиц кварца, в основном, размером менее 0.0015 мм, эпизодически – 0.005 мм (рис. 2).

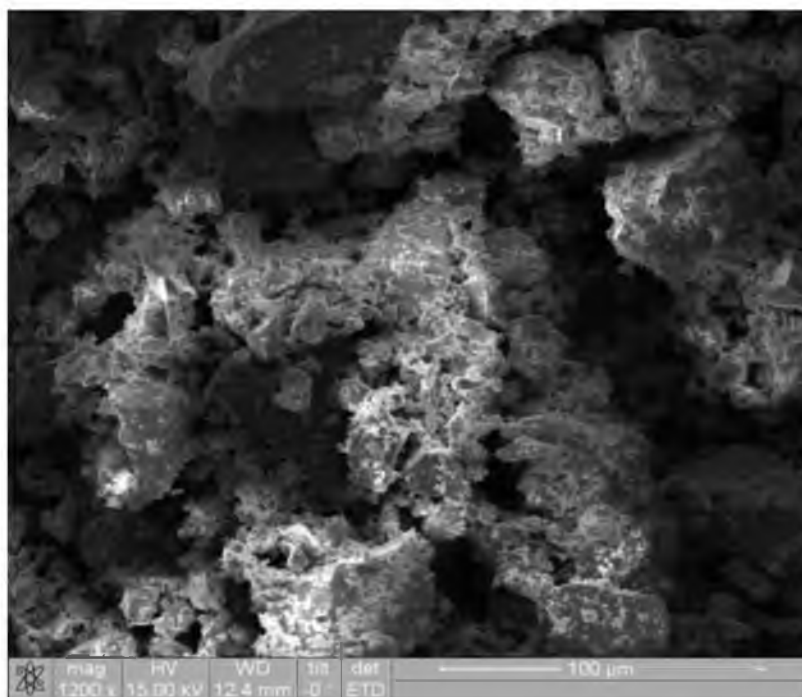


Рис. 2. Адгезия кварца (светлое) на поверхности зерен магнетита (темное), увел. 5000  
Fig. 2. Adhesion of quartz (light) on the surface of grains of magnetite (dark), took. 5000



Частицы кварца имеют неправильную форму и наблюдаются по всей поверхности рудных частиц; на участках со ступенчатыми сколами густота их значительно выше, чем на гладких сколах. Химический анализ показал, что массовая доля свободного диоксида кремния после совместного сухого измельчения магнетита, гематита и гетита с кварцем увеличилась в  $\approx 2.5$  раза, с мартитом – в  $\approx 4$  раза.

При ультразвуковой обработке массовая доля диоксида кремния снижается в рудных минералах неодинаково: в магнетите практически до «фонового» значения, в гетите и мартите – в  $\approx 2.0$  раза, а в гематите – в  $\approx 1.0$  раз. Обработка проб ультразвуком (интенсивность обработки 35 кГц) производилась с помощью ультразвуковой ванны УЗВ-12 ТТЦ (Сапфир, Россия).

Совместное мокрое измельчение осуществлялось в дистиллированной воде при соотношении Т:Ж=1:1, соотношение кварца и рудных минералов оставалось таким же, как при сухом измельчении. При совместном мокром измельчении закрепление субмикронных частиц кварца на поверхности частиц рудных минералов носит такой же характер, как и при сухом, но выражено слабее. Массовая доля свободного диоксида кремния после мокрого измельчения гематита, гетита и мартита с кварцем увеличилась в  $\approx 1.1$  раза, с магнетитом – в  $\approx 1.2$  раза.

Перемешивание (скорость вращения мешалки 920 об./мин.) в дистиллированной воде рудных минералов с субмикронными частицами кварца привело к незначительному его закреплению на их поверхности.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что при совместном измельчении рудных минералов с кварцем происходит закрепление последнего на их поверхности. Размеры частиц кварца, удерживавшихся на поверхности рудных минералов после интенсивной промывки на сите и механической оттирки, не превышали 0.0005–0.001 мм.

Степень закрепления частиц кварца на поверхности рудных частиц для разных минералов различна. Например, в процессе ультразвуковой обработки субмикронные частицы кварца с поверхности магнетита и гетита удаляются практически полностью, с поверхности мартита и гематита – в меньшей степени.

Применение центрифугирования (скорость 5000 об./мин.) незначительно очистило поверхность рудных минералов. При этом был выполнен расчет центробежных сил, способствующих отрыву субмикронных частиц кварца от поверхности рудных минералов. Установлено, например, что при скорости центрифугирования 5000 об./мин. на частицу кварца размером 0.5 мкм действует центробежная сила в  $8.4 \cdot 10^{-10}$  Н (сила тяжести –  $9.8 \cdot 10^{-15}$  Н). Следовательно, величина сил, необходимых для отрыва такой частицы кварца от поверхности частиц рудных минералов, должна быть значительно больше.

Механизм закрепления субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов и модель процесса обусловлены, на мой взгляд, следующим.

При совместном измельчении максимальные усилия, прилагаемые к измельчаемым частицам, превышают пределы прочности этих частиц, поэтому в объёме измельчения, по-видимому, контактируют кристаллические решетки измельчаемых минералов. В результате этого начинают действовать межмолекулярные силы (силы Ван-дер-Ваальса), удерживающие на поверхности рудных частиц субмикронные частицы кварца. Величина этих сил тем больше, чем ближе подобие геометрии и периодов кристаллических решеток на поверхностях этих минералов. Из исследуемых рудных минералов наибольшим подобием геометрии и близостью периодов кристаллических решеток к кварцу характеризуются мартит и гематит, меньшим – магнетит и гетит. Кроме того, закреплению субмикронных частиц кварца на поверхности частиц рудных минералов может способствовать возникновение



электрических зарядов на поверхности частиц кварца вследствие его природного пьезоэлектрического эффекта при деформациях в процессе дезинтеграции. Как показано Е.Н. Липной и П.П. Ананьевым [2009], максимальная величина пьезоэлектрического заряда на частице кварца размером 0.03 мм при его деформации может достигнуть  $3.0 \cdot 10^{-20}$  К. Сила кулоновского взаимодействия между этим зарядом и единичной частицей, например магнетита, на близких расстояниях (0.1–0.01 мкм) может достигать  $1.24 \cdot 10^{-6}$  Н. Развиваемые при этом усилия могут превышать предел прочности кристаллических решеток, и они могут входить в непосредственное соприкосновение без механических усилий. Это подтверждается более интенсивным закреплением субмикронных частиц кварца на поверхности частиц рудных минералов при их совместном сухом измельчении.

Вода как среда измельчения обладает более высокой электропроводностью, чем воздух, что обусловлено находящимися в ней ионами. При измельчении в водной среде пьезоэлектрические заряды разного знака из-за проводимости воды взаимно уничтожаются, что ослабляет эффект закрепления и удержания частиц кварца на поверхности рудных минералов.

### Выводы

1. Установлено прочное закрепление на поверхности частиц рудных минералов джеспилитов: магнетита, маргита, гематита и гетита – субмикронных частиц кварца в процессе их совместного измельчения.

2. Максимальный размер закрепленных частиц кварца не превышает 0,8 мкм. Такие частицы не удаляются с поверхности рудных минералов интенсивной промывкой на сите и механической оттиркой вследствие высокой дисперсности частиц кварца.

3. Закрепление субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов зависит от усилий, приводящих в контакт кристаллические решетки, и типа минерала.

Наиболее прочное закрепление происходит при усилиях, соизмеримых с пределами прочности минералов. По степени уменьшения прочности закрепления и удержания субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов их можно расположить в следующей последовательности: гематит, маргит, гетит, магнетит.

4. Удержание субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов обусловлено межмолекулярными силами взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса) приведенных в контакт кристаллических решеток. Величина этих сил зависит от структурно-геометрического соответствия контактирующих минералов.

5. Притяжению, закреплению и удержанию субмикронных частиц кварца способствуют механические силы при измельчении и заряды на поверхности его частиц, возникающие вследствие природного пьезоэффекта этого минерала. При сухом измельчении оба фактора действуют совместно, при мокром – закрепление, обусловленное пьезоэлектрическими зарядами, проявляется слабее.

6. В процессе измельчения происходит интенсивное закрепление субмикронных частиц кварца на поверхности рудных минералов, т. е. образование «техногенных сростков». Это нивелирует разницу в свойствах поверхностей рудных и нерудных минералов, снижает эффективность раскрытия минералов и разделения их механическими методами.

Выше приведенные исследования охватывают только небольшую часть сложного процесса взаимодействия рудной и нерудной фаз джеспилитов при их совместном измельчении.



### Список литературы

### References

1. Гзогян Т.Н. 2010. Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (4): 389–393.

Gzogyan T.N. 2010. Theoretical and experimental studies of high-quality concentrates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (4): 389–393. (in Russian)

2. Гзогян С.Р. 2011. Обоснование механизма взаимодействия частиц в процессе флокуляции магнетитового концентрата. *Маркшейдерия и недропользование*, (1): 39–41.

Gzogyan S.R. 2011. Substantiation of the mechanism of interaction of particles in the flocculation of magnetite concentrate. *Mine Surveying and Subsurface Use*, (1): 39–41. (in Russian)

3. Липная Е.Н., Ананьев П.П. 2009. Электростатическое взаимодействие частиц магнетитового концентрата в электрическом поле. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (5): 237–244.

Lipnaya E.N., Ananiev P.P. 2009. The electrostatic interaction of the particles of the magnetite concentrate in an electric field. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (5): 237–244. (in Russian)

4. Чантурия Е.Л., Гзогян С.Р. 2012. Современное состояние теории и практики получения высококачественных магнетитовых концентратов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (12): 3–32.

Chanturia E.L., Gzogyan S.R. 2012. The current state of the theory and practice of obtaining high-quality magnetite concentrates. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, (12): 3–32. (in Russian)