

УДК 622.73; 621.538

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОГРАДИЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ

В. Н. Анисимов¹, В. И. Логачев², И. И. Логачев³

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований возможности использования мощных импульсных магнитных полей для разрушения (деструкции) железистых кварцитов. Предложена “магнитокинетическая” модель процесса деструкции железистых кварцитов, в основе которой лежит взаимодействие зёрен магнетита с матрицей кварца при прохождении высокоградиентного электромагнитного импульса через породу. Показано, что высокоградиентное импульсное магнитное поле может быть использовано для деструкции кварцосодержащих горных пород в массиве как в процессах буровзрывных работ, так и при решении геоэкологических проблем при разработке кристаллических пород, сложноструктурных массивов железистых кварцитов на примере месторождений Курской магнитной аномалии (КМА) и на других месторождениях.

Ключевые слова: железистый кварцит, деструкция, импульсное магнитное поле, механические напряжения, упругая волна.

Возможность использования электромагнитных полей для разрушения кристаллических горных пород отмечалась ранее как в работах авторов статьи, так и в работах других авторов [1–5]. Особо следует выделить фундаментальную работу ИПКОН РАН “Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов” [6].

¹ Институт динамики геосфер РАН, Россия, Москва, Ленинский пр-т, 38; e-mail: vicnican@ya.ru.

² ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

³ МИРЭА – “Российский технологический университет”, 119454 Россия, Москва, пр-т Вернадского, 78.

В нашей стране фундаментальные исследования в области создания сильных импульсных магнитных полей и результатов их воздействий на поликристаллические материалы проводились ранее в ФИАН и проводятся в настоящее время. Так новые возможности для практического использования открывают исследования по созданию сверхмощных магнитных полей, ведущиеся в ФИАН совместно с МГТ (США) по созданию сильных магнитных полей до 100 Тл [7].

Актуальной задачей на сегодня является практическое использование результатов вышеназванных исследований при добыче, переработке и процессе деструкции прочных кристаллических горных пород как при взрывной разработке, так и в последующем процессе рудоподготовки, который характеризуется крайне низким коэффициентом использования энергии – до 3% [1, 3].

Известно, что пьезоэлектрические и магнитострикционные свойства таких кристаллических горных пород как железистые кварциты позволяют преобразовывать энергию импульсного электромагнитного поля в поле упругих напряжений. Высокое содержание магнетита в горной породе (до 40%) усиливает роль этих явлений. При определённых условиях напряжения в породе могут превысить предел прочности, что приведёт к её разрушению.

Магнетитовые железистые кварциты представляют собой породу темно-серого цвета с тонкой среднеполосчатой структурой. Главными минералами являются магнетит Fe_3O_4 (28–30%) и кварц (65–70%). Магнитные свойства железистых кварцитов изменяются с изменением напряженности индуцирующего поля, состава, типа и количе-

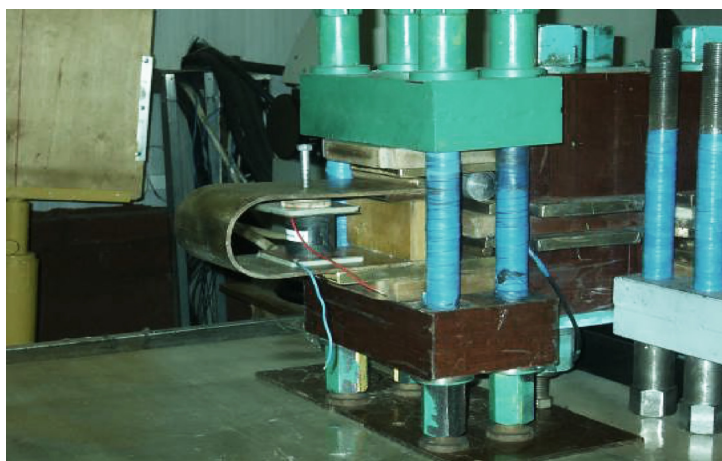


Рис. 1: Общий вид установки для исследования основных свойств железистых кварцитов в импульсном магнитном поле с индукцией до 1 Тл.

ства ферромагнитного материала, размера зёрен, структуры и давления. Известна зависимость магнитной восприимчивости и коэрцитивной силы от размера зёрен минералов. На сегодня с учётом ранее полученных данных представляет практический интерес изучение совместного действия импульсного электромагнитного поля и механических нагрузок, возникающих при прохождении упругих волн напряжения в железистых кварцитах.

Эти исследования проводились с использованием магнитоимпульсной установки в Шатурском филиале ИТЭС РАН, рис. 1 [1, 3, 4].

Схема расположения основных элементов установки и образца показана на рис. 2.

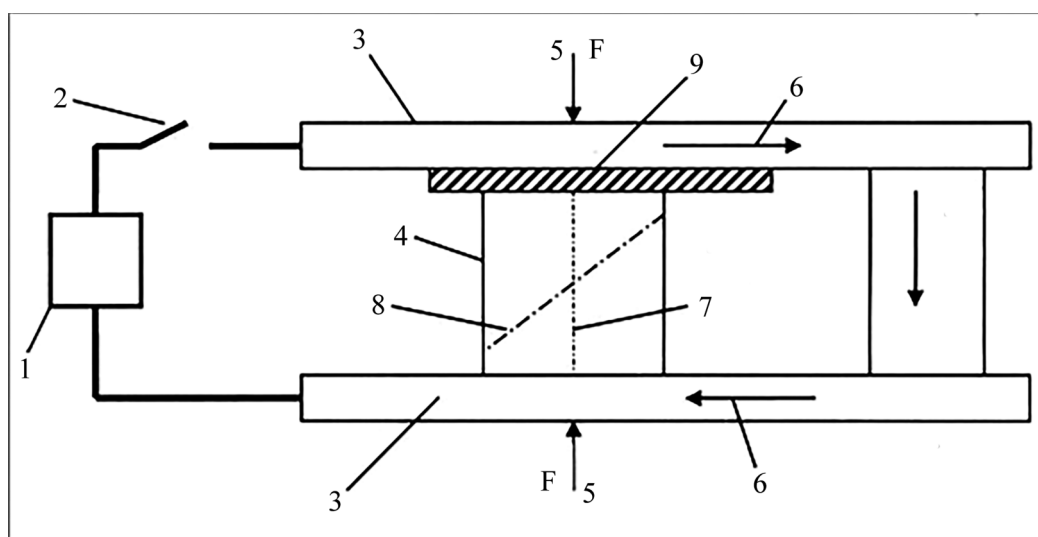


Рис. 2: Схема расположения основных элементов установки и образца: 1 – накопитель энергии; 2 – коммутатор тока; 3 – токопровод; 4 – образец; 5 – направление механической нагрузки F ; 6 – направление тока в токопроводе магнитного диполя; 7 – продольная ось образца; 8 – ось анизотропии образца; 9 – диэлектрик.

Исследуемые образцы помещались в магнитное поле диполя, подключённого к генератору импульсного тока. Образец, как показано на рис. 2, подвергался дополнительному сжатию вдоль его оси. Предварительно проводились измерения сопротивления образцов постоянному току и поглощения упругих волн на частоте 0.3–6 МГц. Генератор тока создавал импульс, форма которого представлена на рис. 3.

После трёхкратного импульсного воздействия на каждом из образцов были обнаружены внешние признаки механической деструкции в виде трещин, мелких сколов, видимых невооруженным глазом.

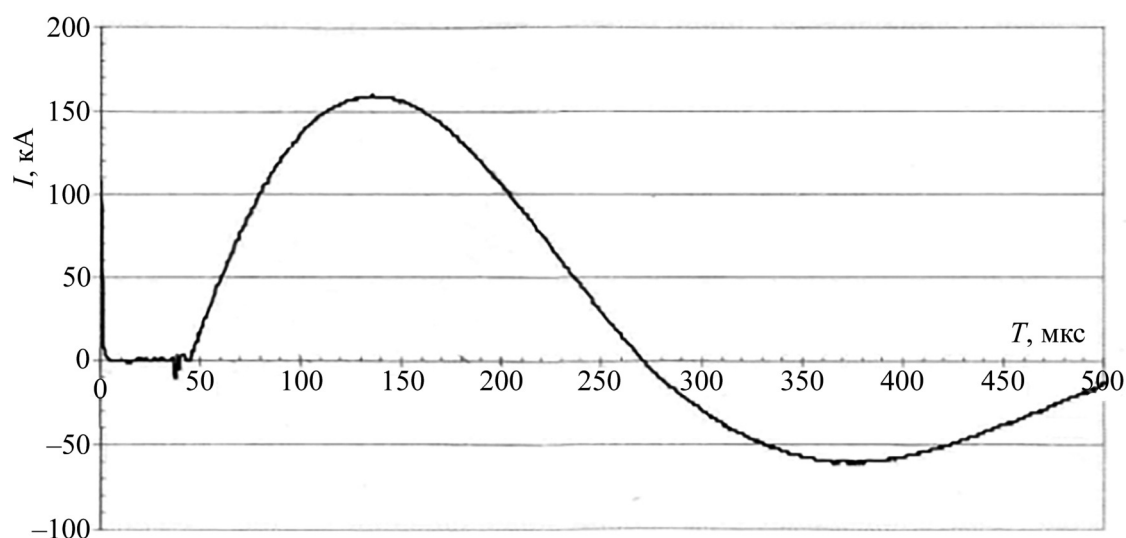


Рис. 3: Форма импульса тока в шине токопровода магнитного диполя.

Для изучения эффекта деструкции образцов железистых кварцитов исследовались электросопротивление образцов и поглощение упругих волн до и после импульсного магнитного воздействия. Измерение электросопротивления образцов проводилось мегомметром Е-6-16 при зондирующем напряжении 500 В. Результаты измерения сопротивления образцов до обработки импульсным магнитным полем, после воздействия и спустя 4 месяца представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Сопротивление образцов до и после воздействия

Номер образца	Сопротивление R , кОм		
	До испытаний	После испытаний	Спустя 4 месяца
1	30000	190	900
2	540	0.1	3.5
3	280	0.23	2.7
4	14	0.035	0.2

Импульсное электромагнитное воздействие приводит к уменьшению сопротивления образца на 1–4 порядка.

Исследовалось также поглощение упругих волн в диапазоне частот до 6 МГц, которое также приводит к образованию микротрещин в породе. На рис. 4 приведена частот-

ная зависимость коэффициента затухания α продольных волн в железистых кварцитах до (кривая 1) и после (кривая 2) воздействия магнитного поля.

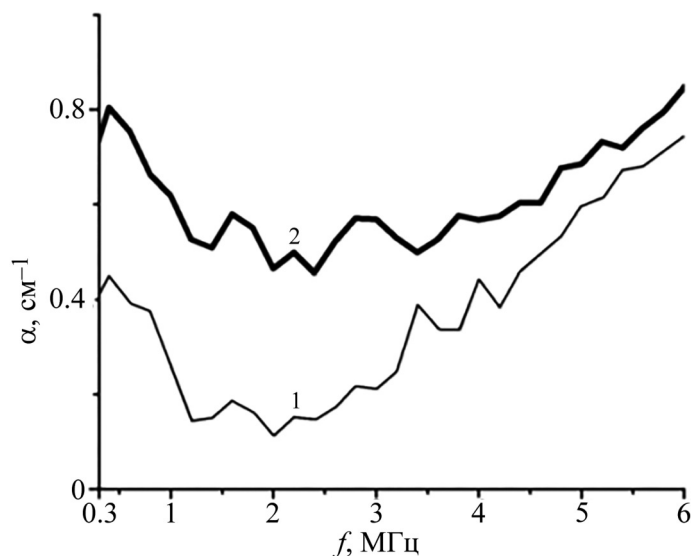


Рис. 4: Поглощение ультразвука в образцах железистого кварцита до (кривая 1) и после (кривая 2) воздействия импульсного магнитного поля.

Из рис. 4 видно, что коэффициент затухания в этом частотном диапазоне в среднем увеличился в 2–2.5 раза. Так, например, значение коэффициента затухания на частоте 2 МГц до воздействия упругой волны составляло 0.2 см^{-1} , а после воздействия составляло 0.5 см^{-1} .

Было проведено сканирование по поверхности образца в режиме эхоскопии. Оказалось, что уровень структурного шума возрос в 2–3 раза для образцов, подвергнутых воздействию магнитного поля, что свидетельствует об изменении внутренней структуры образцов. Дальнейшее сканирование по поверхности образца позволило выявить наличие микротрещин, их локализацию и протяженность.

Проведенные эксперименты позволяют утверждать, что импульсное электромагнитное воздействие на железистые кварциты вызывает значительные структурные нарушения, связанные с возникновением и развитием новых макро- и микротрещин.

На рис. 5 и рис. 6 представлено исходное состояние поверхности образца железистого кварцита и состояние после воздействия импульсного магнитного поля.

На рис. 6 черными стрелками показаны некоторые трещины в массиве кварца. Белыми стрелками показаны области разрушения структуры по границам зёрен кварца.

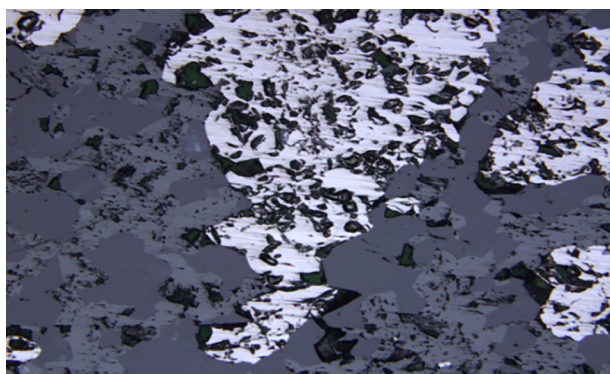


Рис. 5: Исходный железистый кварцит. Белое поле – магнетит, серое – кварц.

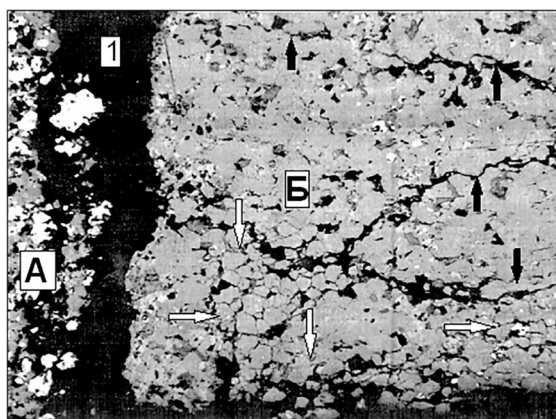


Рис. 6: Состояние железистого кварцита после импульсного электромагнитного воздействия. Макротрещина (1) на границе рудного (А) и нерудного (Б) прослоев в железистом кварците.

Зёрна магнетита – белое, кварц – серое, черное – макро- и микротрещины и места выпадения зёрен, потерявших связь с матриксом.

На рис. 7 показаны раскрытые зёрна магнетита и кварца, потерявшие связь с матриксом и выпавшие из образца при его обработке импульсным магнитным полем.

Таким образом, экспериментальные результаты показали, что во всём частотном диапазоне измерений образцы железистого кварцита, обработанные импульсным электромагнитным полем, претерпели достаточно сильные изменения по сравнению с первоначальным состоянием. Это отразилось в появлении системы микротрещин по границам рудных и нерудных слоёв, микротрещин по границам зёрен магнетит–магнетит, магнетит–кварц и кварц–кварц, а также в уменьшении скорости звука и увеличении коэффициента затухания.

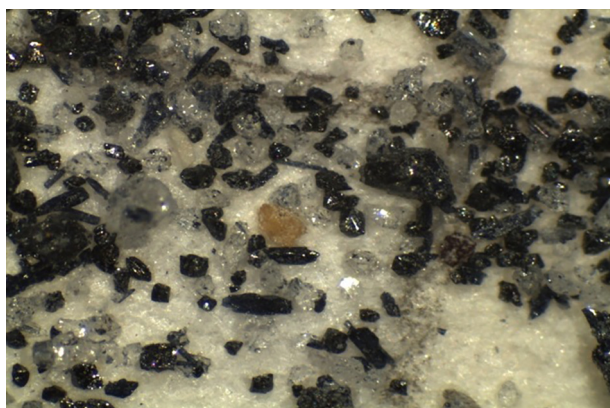


Рис. 7: Раскрытые зёрна магнетита и кварца после импульсного электромагнитного воздействия. Здесь хорошо видна естественная форма зёрен, полностью сохранивших свою морфологию.

Для объяснения полученных результатов была предложена “магнитокинетическая” модель, в основе которой лежит взаимодействие зёрен магнетита с матрицей кварца при прохождении высокоградиентного магнитного импульса через породу [4, 5].

Под действием мощного высокоградиентного электромагнитного импульса зёрна магнетита и кварца поворачиваются и смещаются, и их перемещению препятствует породная матрица. В результате зёрна магнетита деформируются и частично разрушают матрицу и межзёренные границы. Образуется развитая система новых микротрещин, на это указывает эффект увеличения поглощения ультразвука в диапазоне 0.5–5 МГц (рис. 4).

Основные силы, действующие на частицу и приводящие к магнитокинетическому эффекту, следующие: магнитная сила, обусловленная импульсным магнитным полем; сила, вызванная магнитострикцией ферромагнетика [4].

При высокоградиентном импульсном электромагнитном воздействии перемещению зёрен магнетита под действием сил магнитного поля мешает плотная рудная матрица. Это приводит к импульсной деформации зёрен Fe_3O_4 , их повороту по вектору магнитного поля с деструкцией межзёренных границ, возникновению разрушающих напряжений и к разрыву сплошности рудной матрицы преимущественно по границам зёрен. Частично диспергированный магнетит заполняет часть микротрещин, образуя электропроводящую структуру и, соответственно, новые пути прохождения электрического тока. В результате резко падает электросопротивление образца.

Таким образом, следует предположить, что магнитокинетический эффект в железистых кварцитах – это ударный импульс в основном на зёрна магнетита, перемещающихся под действием сил импульсного электромагнитного поля, сопровождающийся деструкцией материала и приводящий к изменению его физических свойств.

Наиболее простым способом создания необходимого импульсного магнитного поля является использование магнитного поля диполя (витка током).

Расчёты магнитного поля диполя были выполнены ранее [1, 2]. При расчётах считалось, что виток с током погружен в ферромагнитный материал ($\mu = 10$). Для расчёта напряженности магнитного поля и его градиента использовались следующие выражения [8]:

$$\begin{aligned} H_r(r, z) &= \frac{1}{2\pi} \frac{z}{r \sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[-K(k) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right], \\ H_z(r, z) &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \left[K(k) + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} E(k) \right], \\ H_\varphi(r, z) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $k^2 = \frac{4ar}{(a+r)^2 + z^2}$, $K(k)$ и $E(k)$ – полные эллиптические интегралы 1-го и 2-го рода, a – радиус витка (м), z – расстояние (м) по оси витка перпендикулярно его плоскости, r – радиальная координата (м), I – ток (А), H – напряженность магнитного поля (А/м).

Расчёты, выполненные на основании этих формул, позволяют получить распределение магнитного поля и его градиента во всём пространстве и оценить его воздействие на породу. При расчётах индукции магнитного поля B ($B = \mu\mu_0 H$) радиус витка варьировался от 1 м до 10 м, координата z – от 1 м до 3 м, ток принимался равным 10^6 А.

Зависимость модуля индукции магнитного поля B (Тл) от радиуса r (м) для витка радиусом 10 м представлена на рис. 8.

Как видно из рис. 8 магнитное поле в приосевой области слабо зависит от координаты z , в то же время резко возрастает при уменьшении координаты z в области кругового тока. В этой области становится существенным градиент магнитного поля. При уменьшении радиуса витка область больших градиентов увеличивается.

Расчёты магнитного поля и его градиента витка с током позволяют оценить результаты его силового воздействия на основные компоненты породы, содержащей кварц и магнетит, оценить напряжения, возникающие на границах кварца и зёрен магнетита в слоистой структуре. Рассмотрим этот процесс подробнее.

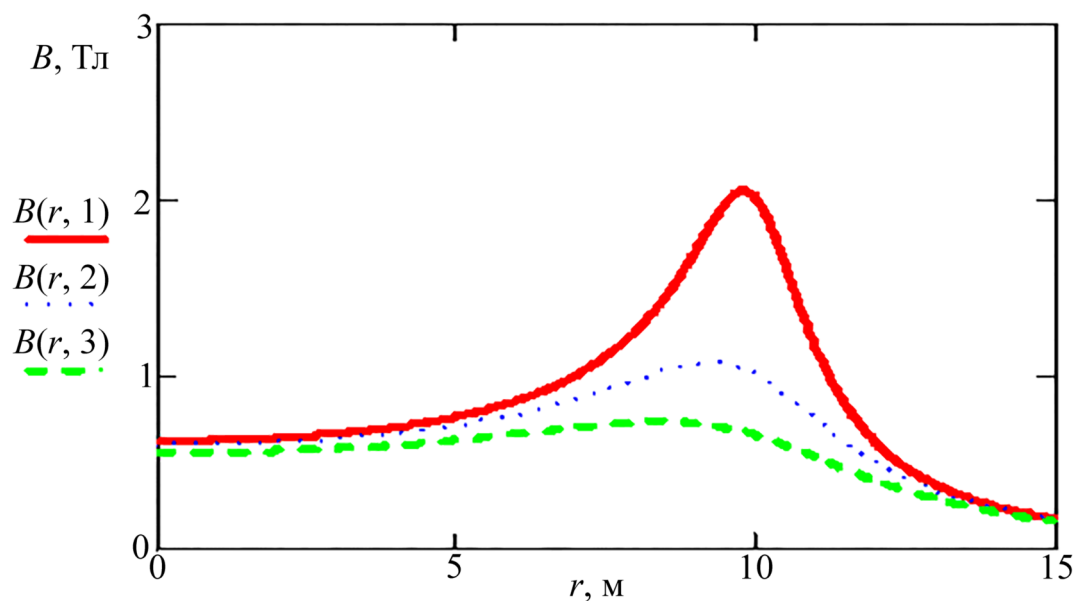


Рис. 8: Зависимость модуля вектора индукции магнитного поля $B(r, z)$ от радиуса для трех значений координаты z (1 м, 2 м, 3 м). Радиус витка – 10 м.

В импульсном электромагнитном поле направленная магнитная сила притяжения минерального зерна к источнику поля определяется по формуле [9]:

$$F_m = \mu_0 \chi m H \text{grad} H, \quad (2)$$

где F_m – сила воздействия на породу со стороны магнитного поля (H); μ_0 – магнитная постоянная, равная $1.26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м; χ – удельная магнитная восприимчивость частиц магнетита, $\chi = 5 \times 10^{-4}$ м³/кг; m – масса зерна (агрегата зёрен в слоях) (кг); H – напряженность магнитного поля 10^7 А/м; $\text{grad}(H)$ – градиент напряженности магнитного поля (10^8 А/м²).

Для оценок рассмотрим зерно магнетита массой 1 г кубической формы с ребром $a = 5.85$ мм и площадью грани куба 0.34 см². Сила, действующая на это зерно, составляет порядка ≈ 630 Н (для магнитного поля порядка 1 Тл.) Соответствующее напряжение σ больше 18 МПа, что соответствует пределу прочности кварцита на сжатие [10].

Аналогичные оценки силы притяжения (F_m) и механических напряжений (σ) в зависимости от размеров зерна магнетита представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

*Сила, действующая на зерно магнетита и механические напряжения
в зависимости от размера зёрен*

a (см)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
F_m (Н)	3.15	25.12	85.05	201.6	392.5	678.2
σ (МПа)	3.15	6.28	9.45	12.56	15.70	18.84

Полученные оценочные расчёты и анализ позволяют сделать вывод о том, что высокоградиентное импульсное магнитное поле может быть использовано для деструкции кварцсодержащих горных пород в массиве как в процессах буровзрывных работ, так и в процессах взрывной и последующей рудоподготовки, а также в геофизических исследованиях [11].

Предложенный метод прошел предварительную апробацию в производственных условиях Коробковского и Лебединского месторождений КМА. При внедрении метода взрывомагнитной деструкции (взаимодействие импульсного магнитного поля с одновременным наложением упругих импульсов волн напряжений, генерируемых скважинными зарядами, ВВ) он обеспечит: улучшение технологических показателей последующего передела рудной массы; снижение энергозатрат и потерь полезных компонентов в хвостах обогащения; значительный экономический эффект; решение сложившихся крайне острых геоэкологических проблем при добыче и последующей глубокой переработке железистых кварцитов как в регионе КМА, так и других горнорудных регионах страны [1, 4, 11].

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. Н. Анисимов, Горный информационный аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 6, 80 (2018).
- [2] В. Н. Анисимов, И. И. Логачев, Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), № 1, 210 (2017).
- [3] В. Н. Анисимов, *Взрывомагнитная деструкция кристаллических материалов (горных пород) различными импульсными динамическими воздействиями* (М., изд-во Военно-инженерной Академии им. Н. Е. Жуковского, 2008), с. 128.
- [4] V. N. Anisimov and V. N. Morozov, "Ferruginous Quartzite Destruction under High Explosion and Magnetic Effect" in: *Proceedings of the 6th International Conference*

- on Physical Problems of Rock Destruction* (Metallurgical Industry Press, Cina-Dalayn, 2009), p. 209-212.
- [5] Н. Петч, *Металлографические аспекты разрушения* в: Разрушение. Т. 1. Под ред. Г. Либовиц. (М., Мир, 1973), с. 376-420.
- [6] В. А. Чантурия, К. Н. Трубецкой, С. Д. Викторов, И. Ж. Бунин, в: *Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов* (М., Институт проблем комплексного освоения недр ИПКОН РАН, 2006), с. 215.
- [7] Мощные источники магнитного поля. Промышленные ведомости №5-6. Июнь 2013 г. <https://www.promved.ru/index.shtml>.
- [8] И. Е. Тамм, *Основы теории электричества* (М., Физматлит 2003), с. 300.
- [9] В. И. Кармазин, В. В. Кармазин, *Магнитные методы обогащения* (М., Недра, 1978), с. 255.
- [10] *Справочник (кадастр) физических свойств горных пород* (М., Недра, 1975), с. 36-49.
- [11] V. N. Anisimov, A. M. Adamchuk, V. M. Uvarov, and A. Y. Scherbakov, *Indian Journal of Science and Technology* **9**(46), 107486 (2016).

Поступила в редакцию 8 июля 2019 г.

После доработки 22 ноября 2019 г.

Принята к публикации 25 ноября 2019 г.