

## СТАТЬЯ

УДК 622.02(075.8)

**СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ ЗЕРЕН ГОРНЫХ ПОРОД  
В СВЧ-ПОЛЯХ****Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т., Белекова Ж.Ш.***Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек,  
e-mail: raia-ktu@mail.ru, aikat80@mail.ru, jyldyza.88@mail.ru*

Предварительное разупрочнение крепких горных пород (до измельчения) под воздействием физических полей составляет важную часть в технологической цепочке извлечения металлов и полезных компонент. Влияние физических полей на горные породы приводит к изменению их механических свойств, формированию структурных изменений на границах и внутри зерен, нарушению структурных связей руд и минералов. Наиболее эффективным видом энергии для изменения прочности горных пород из всех применяемых видов энергии считается энергия сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Энергия СВЧ-поля существенно изменяет структурное состояние и прочностные характеристики горных пород. В этой статье приведены результаты изменения структурного состояния мрамора под воздействием сверхвысокочастотного поля. Получены результаты с помощью светового микроскопа марки Axio Imager и для количественной оценки зерен была использована программа ImageJ. После обработки результатов программой ImageJ гистограмма значений показала следующие результаты. Количество зерен после облучения изменяется неоднозначно, для 1 мин и 5 мин воздействия СВЧ-волн приводит к уменьшению зерен мрамора, а для 3 мин и 7 мин, наоборот, увеличивается плотность дислокаций на границе зерен. Выявлено, что СВЧ-облучение существенно влияет на механические параметры и тип диаграммы деформирования горных пород. Плотность дислокации на границе блока изменяется неоднозначно, СВЧ-облучение горных пород приводит к структурным изменениям в зависимости от минералов. Структурные изменения приводят к уменьшению упругих характеристик, в том числе прочности зерен мрамора при СВЧ-воздействии.

**Ключевые слова:** горная порода, СВЧ-поля, время облучения, температура нагрева, размер зерен, структурные изменения, плотность дислокаций, количественный анализ зерен, упругие характеристики

**STRUCTURAL ANALYSIS OF ROCK MINERAL GRAINS  
IN SUPERHIGH-FREQUENCY FIELDS****Sultanalieva R.M., Konushbaeva A.T., Belekova Zh.Sh.***Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek,  
e-mail: raia-ktu@mail.ru, aikat80@mail.ru, jyldyza.88@mail.ru*

Preliminary softening of strong rocks (before grinding) under the influence of physical fields is an important part in the technological chain of extraction of metals and useful components. The influence of physical fields on rocks leads to a change in their mechanical properties, the formation and change of structural changes at the boundaries and inside the grains, and the disruption of the structural bonds of ores and minerals. The most effective type of energy for changing the strength of rocks, of all the types of energy used, is considered to be the energy of a microwave electromagnetic field. The energy of the microwave field significantly changes the structural state and strength characteristics of rocks. This article presents the results of the change in the structural state of marble under the influence of a microwave field. The results were obtained using an Axio Imager light microscope and the ImageJ program was used to quantify the grains. After processing the results with the Image G program, the histogram of values showed the following results: The number of grains after irradiation changes ambiguously, for 1-minute and 5-minute exposure to microwave waves leads to a decrease in marble grains, and for 3 minutes and 7-minute, on the contrary, it increases density of dislocations at the grain boundary. It was revealed that microwave irradiation significantly affects the mechanical parameters and the type of rock deformation diagram. The dislocation density at the block boundary changes ambiguously; microwave irradiation of rocks leads to structural changes depending on the minerals. Structural changes lead to a decrease in elastic characteristics, including the strength of marble grains under microwave exposure.

**Keywords:** rock, microwave fields, irradiation time, heating temperature, grain size, structural changes, dislocation density, quantitative analysis of grains, elastic characteristics

В процессе извлечения полезных компонентов из крепких руд и минералов, для изменения механических свойств пород под воздействием физических полей, используются закономерности и механизмы процессов преобразования структурного состояния горных пород. При выборе рационального вида и режима физических полей для обработки минерального сырья необходимо знание этих закономерностей, позволяющих обеспечивать экономическую

выгоду, эффективность и экологическую чистоту производства. Не полностью раскрывается механизм изменения свойств горных пород, происходящего под воздействием внешних полей, когда рассматриваем их как традиционные физические процессы. Только новые подходы, учитывающие разнородность горных пород, понимание механизма и причин структурных преобразований, позволяют обеспечить существенное уменьшение энергоёмкости процесса из-

мельчения. Характер изменения горных пород под воздействием физических полей зависит от различных факторов: минералогического состава и структуры пород, а также из вида воздействия физических полей. Для того чтобы получить необходимую информацию об изменениях структурного состояния происшедших на всех уровнях после воздействия физических полей, необходимо понимать, что произошло с горной породой. Структурное состояние горной породы используется для более полной характеристики состояния полиминеральных руд и минералов. Дефектность и напряженное состояние ее структурных элементов в целом можно понимать как структурное состояние горных пород [1, 2].

Структурные состояния горных пород в целом изменяются под воздействием физических полей. Под воздействием электромагнитного поля сверхвысоких частот рудосодержащие минералы нагреваются, а пустая порода вначале остается холодной. В связи с этим на границах раздела фаз возникают сильные термомеханические напряжения, приводящие к образованию новых микротрещин, и формируются остаточные напряжения, которые обуславливают изменение структурного состояния породы. Эти процессы приводят к уменьшению прочности пород в несколько раз [3, 4].

Цель исследования – оценка влияния воздействия полей СВЧ на структурные изменения минеральных зерен горных пород.

#### Материалы и методы исследования

В этой работе приведены результаты изменений структурного состояния горной породы под воздействием СВЧ-поля при определенном оптимальном времени. Для изучения изменений параметров структурного состояния использовались образцы из мрамора, отобранного из месторождения Токтозан, представляющие исходные состояния, т.е. до облучения и после СВЧ-облучения.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены из мрамора 6 образцов, и для каждого образца в исходном состоянии производилась съемка с помощью светового микроскопа марки Axio Imager.

Затем каждый из образцов по отдельности помещался в СВЧ-печь и подвергался нагреву от 1 до 7 мин. Для образцов мрамора после воздействия СВЧ-поля также производилась съемка с помощью микроскопа. Этапы выявления границ зерен при наших экспериментальных данных проводились следующим образом: шлифование, полирование. Шлифование проводилось на алмазных чашках. Полировка производилась на алмазных черепашках зернистостью № 30 (далее шлифовальный круг меняется на № 50, 100, 200, 400, 600, 800). Для количественной оценки зерен была использована программа ImageJ, программа ImageJ предоставлена на сайте <http://rsb.info.nih.gov/ij/> [5]. Данная программа представляет собой независимый дистрибутив, написанный на языке JAVA и предназначенный для обработки, преобразований и широкого спектра аналитических процедур над цифровыми изображениями [6].

На рис. 1 представлена последовательность работы программы ImageJ, в главном окне приводится файл Open. Рабочий язык программы на английском языке.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Для всех цифровых изображений образцов мрамора (в исходном и после воздействия СВЧ-поля) были определены площади границ зерен и гистограмма изображений.

На рис. 2. а, отображена структура мрамора в исходном состоянии, до облучения. Параметры измерения были заданы в микрометрах с помощью команды Analyze > Set Scale.

Команда Threshold используется для фиксирования границ зерен, выделяемые границы окрашиваются в красный цвет. Используя данную команду, можно автоматически или интерактивно настроить верхние и нижние значения порога для сегментирования области интерфейса и заднего фона изображения. На цифровых изображениях образцов горных пород при заданном значении границы выделяются красным цветом, а задний фон останется серым.

Затем, с помощью команды Analyze Particles, находится площадь объектов.

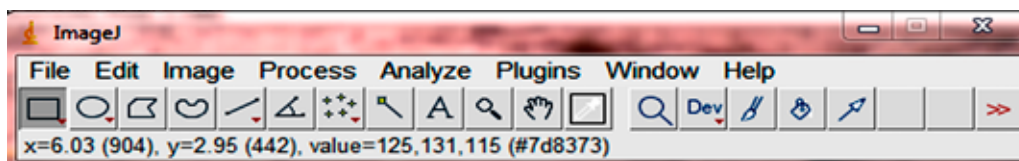
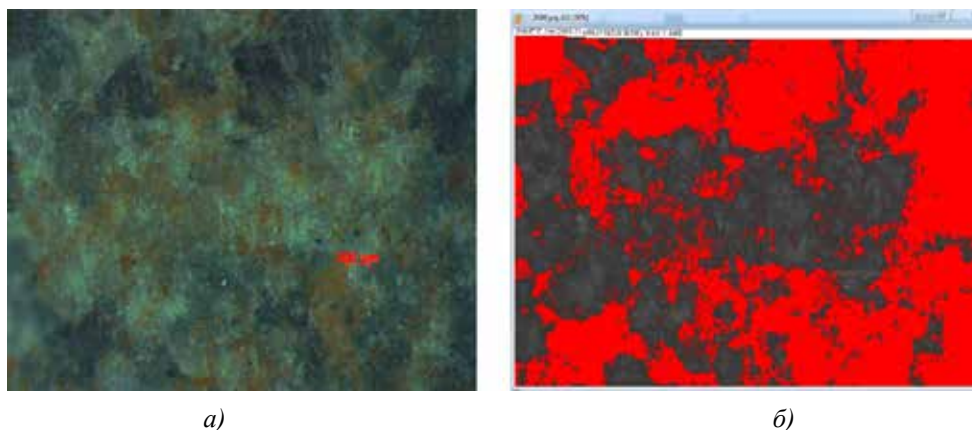


Рис. 1. Интерфейс программы ImageJ



а)

б)

Рис. 2. а) исходная структура мрамора; б) работа команды Threshold

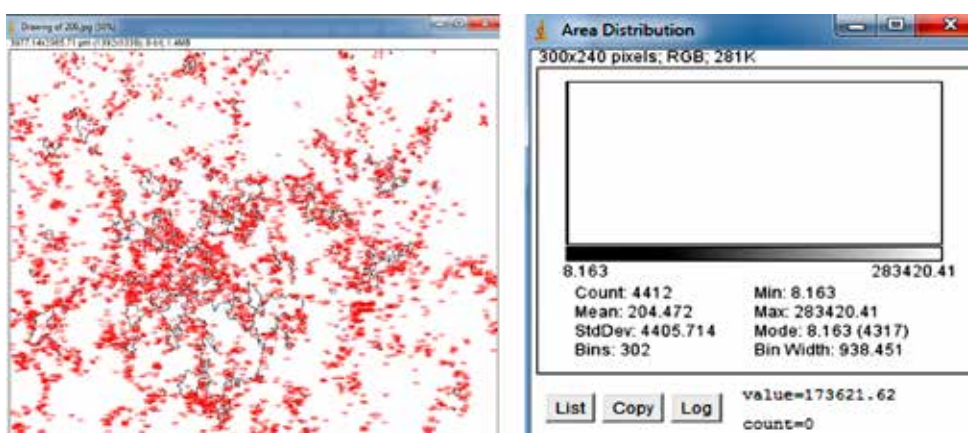


Рис. 3. Результат площадей границ зерен и гистограмма изображения

На следующем окне показан подсчет значений и общая площадь объектов. Для определения размеров исследуемых объектов используется поле Size. Если размеры цифровых изображений образцов или выделенные объекты на изображениях будут больше указанных, то они учитываются [5, 6]. На исходном образце (до облучения) подсчитаны все границы и показаны на рис. 3.

Площадь выделения на рисунке приведена как Area Distribution (если его нет, то всего изображения), подсчитывается в квадратных пикселях. Гистограмма изображения для исходного состояния образца показывает, что всего 4412 значений: 8,163 мкм – минимальный размер зерен, 283420,41 мкм – максимальный размер зерен.

Гистограмма цифрового изображения образца мрамора после воздействия СВЧ-поля за 1 мин показывает, что всего 1298 значений: из них 8,163 мкм – минимальный размер зерен; 36987,754 мкм – максимальный размер зерен.

Под воздействием СВЧ-поля, где время облучения составляет 3 мин, в гистограмме изображения всего 2190 значений: 8,1632656 мкм – минимальный размер зерен; 143020416 мкм – максимальный размер зерен.

В гистограмме изображения, где время облучения составляет 5 мин, всего 1091 значения: 8,163 мкм – минимальный размер зерен; 73240,812 мкм – максимальный размер зерен.

В гистограмме изображения, где время облучения составляет 7 мин, всего 1520 значений: 8,163 мкм – минимальный размер зерен; 52187,754 мкм – максимальный размер зерен.

На основе структурного анализа, полученного с помощью программы Image J для образцов мрамора, до и после СВЧ-облучения, были определены средние размеры блоков мозаики  $D$ , величины дислокации на границе блока мозаики  $\rho_D$ .

Как видно из таблицы, СВЧ-облучение в продолжительности 3 мин влияет также на деформационные характеристики горных пород, для мрамора (Новороссийск) происходит значительное уменьшение модуля упругости [7].

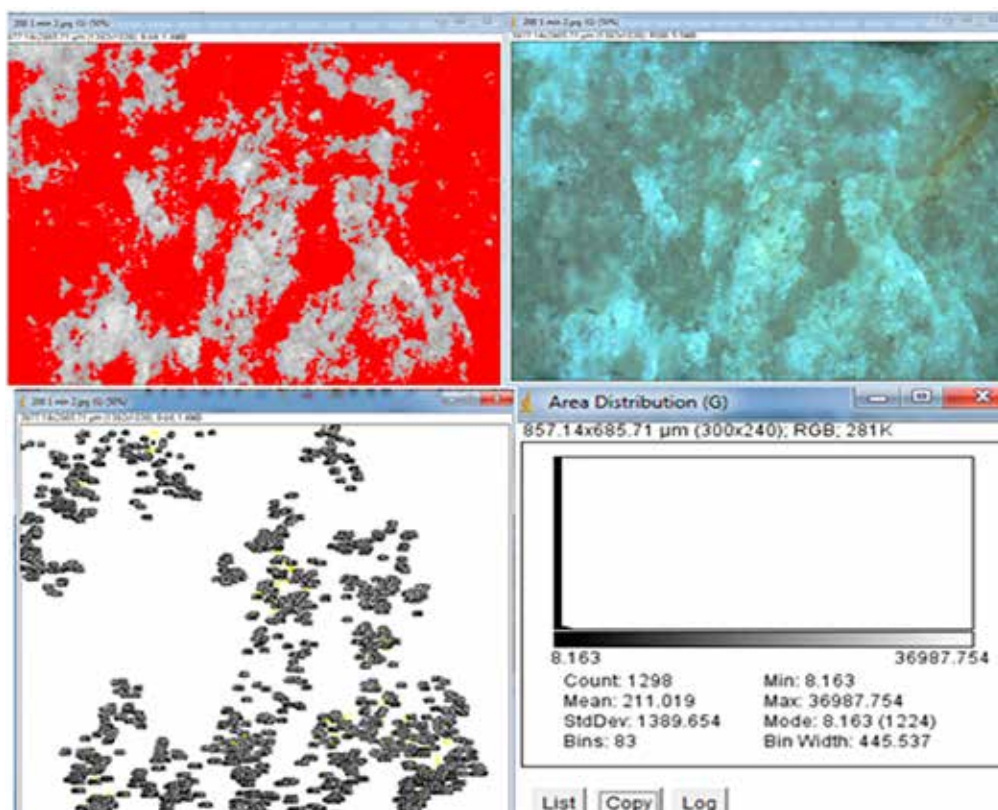


Рис. 4. Структура образца мрамора (время облучения 1 мин) после обработки на ImageJ

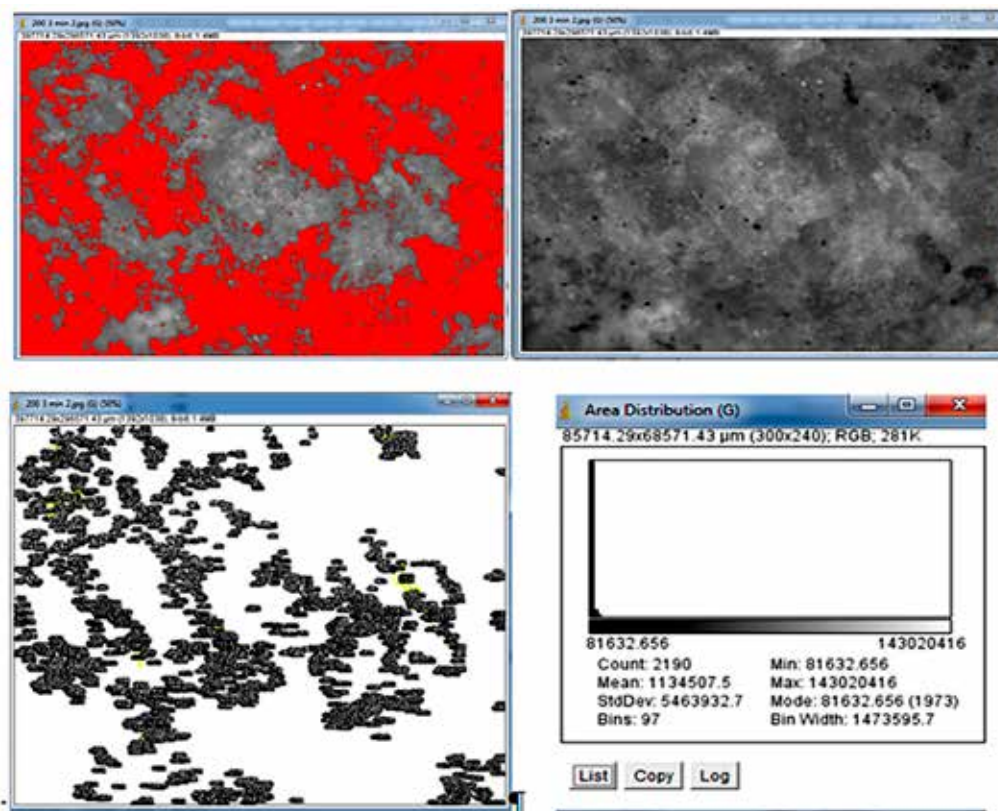


Рис. 5. Структура образца мрамора (время облучения 3 мин) после обработки на ImageJ

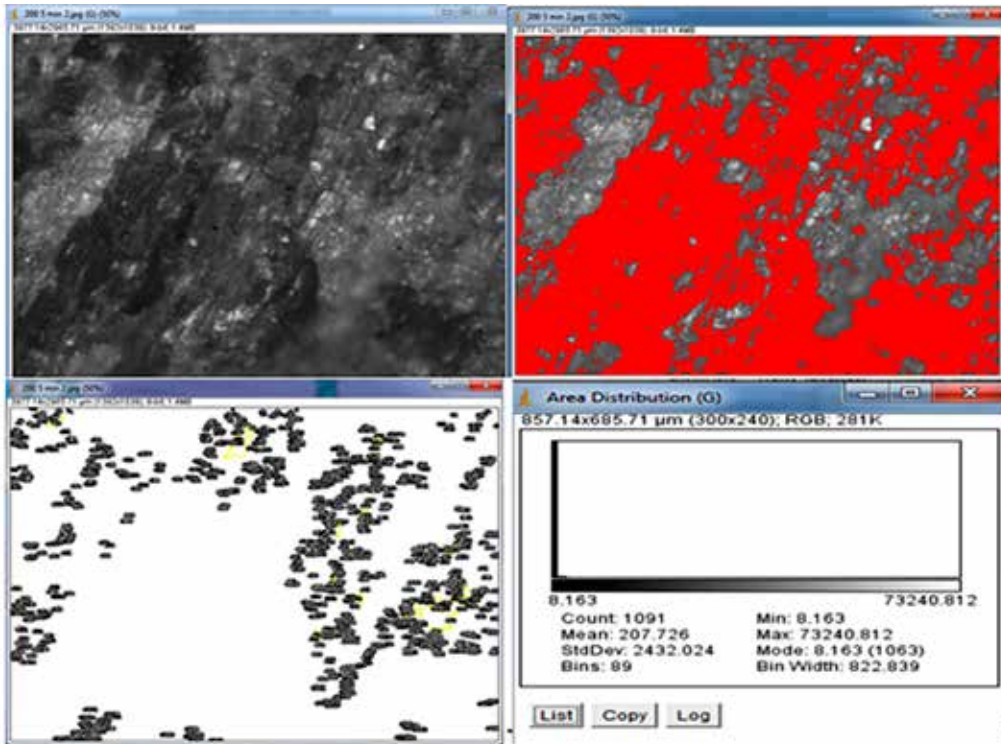


Рис. 6. Структура образца мрамора (время облучения 5 мин) после обработки на ImageJ

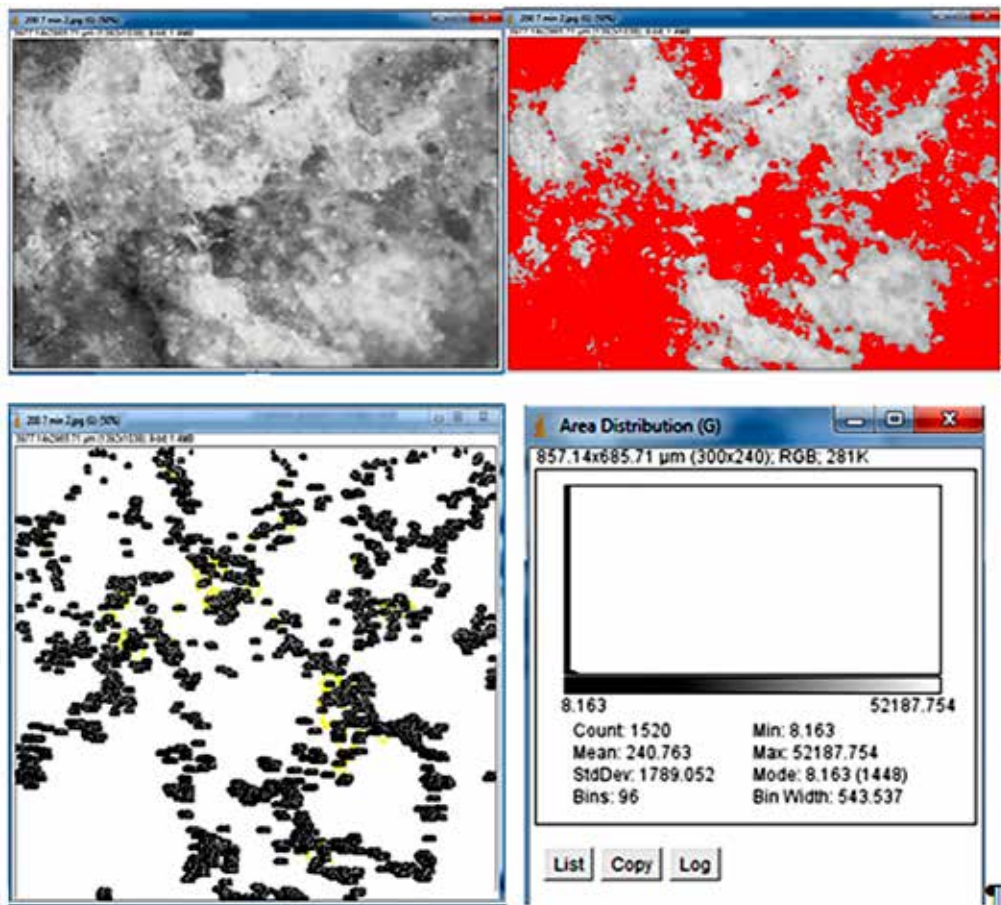


Рис. 7. Структура образца мрамора (время облучения 7 мин) после обработки на ImageJ

## Деформационные характеристики и параметры структуры горных пород

Название породы	Состояние породы	Номер образца	Модуль упругости, $E$ , МПа	Коэффициент Пуассона, $\mu$	Плотность дислокаций, $\rho_D \cdot 10^{-10}$ , см <sup>2</sup>
Мрамор (Новороссийск)	исходное	1	0,76	0,18	9,4
	после облучения	3	0,3	0,40	29

**Выводы**

На основе результатов исследовательского структурного анализа исследуемых образцов мрамора можно сделать следующие выводы:

1. Поле сверхвысоких частот влияет на механические характеристики и на диаграмму деформирования образцов исследуемой горной породы. Воздействие СВЧ-облучения приводит к структурным изменениям в горных породах в зависимости от минералов, а это приводит к неоднозначному изменению плотности дислокации на границе блока.

2. После обработки результатов программой ImageJ гистограмма значений показала следующие результаты: количество зерен после облучения изменяется неоднозначно, для 1 мин и 5 мин воздействия СВЧ-волн приводит к уменьшению зерен мрамора, а для 3 мин и 7 мин, наоборот, увеличивается плотность дислокаций на границе зерен.

3. Изменение плотности дислокаций во время воздействия СВЧ-волн приводит к упругим искажениям кристаллической решетки горных пород и создает многочисленные препятствия к перемещению дислокаций. Структурные изменения при-

водят к уменьшению упругих характеристик, в том числе прочности зерен мрамора при СВЧ-воздействии.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, ранее полученными другими методами.

**Список литературы**

1. Зильбершмидт М.Т. Механизм изменения структурного состояния горных пород при внешнем воздействии // Физические процессы в горных породах: материалы Всесоюзной конференции. М., 1984.
2. Султаналиева Р.М. Принципы целенаправленного изменения механических свойств руд и минералов: монография. Бишкек, 2014. С. 153.
3. Петров В.М. Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ. М.: Информост, 2014. С. 35–41.
4. Абкин Е.Б., Барон Л.И., Логунцов Б.М., Позин Е.З. Измельчение руд с применением электромагнитной энергии СВЧ // Обогащение руд. 2016. № 9. С. 2–5.
5. Пантелеев В.Г., Егорова О.В., Клыкова Е.И. Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера, 2016. С. 304.
6. Анисович А.Г., Басалай А.В. Оценка ошибок оператора при количественном анализе структуры компьютерными методами // Литье и металлургия. № 4 (68). 2012. С. 145–150.
7. Соловьев В.И. Взаимодействие мощных СВЧ-полей с рудными породами различного состава // Обогащение руд. 2016. № 2. С.13–14.