

УДК 622.02 (075.8)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА  
ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В  
РЕЗУЛЬТАТЕ СВЧ-ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

**Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т.**  
КГТУ им. И. Раззакова

Из всех применяемых видов энергии, для изменения физико-механических характеристик горных пород, в настоящее время считается наиболее эффективным, энергия сверхвысокочастотного электромагнитного поля (СВЧ), которая существенно изменяет структурное состояние горных пород. В этой статье приведены результаты экспериментальных исследований структурных изменений мрамора при определенном оптимальном времени СВЧ-воздействия, с помощью светового микроскоп марки Axio Imager и для количественной оценки зерен была использована программа «ImageJ». Выявлено что, СВЧ облучения существенно влияет на механическое поведения и характер диаграмм деформирования образцов. Плотность дислокации на границе блока изменяется неоднозначно, СВЧ облучение горных пород приводит к структурным изменениям в зависимости от минералов. Структурные изменения приводит 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.

**ЭҢ ЖОГОРКУ ЖЫШТЫКТАГЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТТИК  
НУРЛАНУУНУН ТААСИРИНИН НАТЫЙЖАСЫНДА ТОО  
ТЕКТЕРИНИН ТҮЗҮЛҮШҮНДӨГҮ ӨЗГӨРҮҮНҮН МЕХАНИЗМИН  
ЭКСПЕРИМЕНТТИК ИЗИЛДӨӨ**

**Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т.**  
И.Раззаков атындагы КМТУ

Тоо тектердин физикалык-механикалык мүнөздөмөлөрүн өзгөртүү үчүн колдонулуучу энергиянын бардык түрлөрүнүн ичинен азыркы учурда микротолкундуу электромагниттик талаанын (микротолкун)

энергиясы эң эффективдүү болуп эсептелет, бул тоо тектердин структуралык абалын олуттуу түрдө өзгөртөт. Бул макалада Axio Imager жарык микроскопунун жардамы менен микротолкундуу экспозициянын белгилүү бир оптималдуу убагында мрамордун структуралык өзгөрүүлөрүн эксперименталдык изилдөөлөрдүн натыйжалары берилген жана дандардын санын аныктоо үчүн ImageJ программасы колдонулган. Микротолкундуу нурлануу үлгүлөрдүн механикалык жүрүм-турумуна жана деформация диаграммаларынын мүнөзүнө олуттуу таасир этээри аныкталган. Блоктун чектеринде дислокациянын тыгыздыгы эки ача өзгөрөт, тоо тектердин микротолкундуу нурлануусу минералдарга жараша структуралык өзгөрүүлөргө алып келет. Структуралык өзгөрүүлөр микротолкундуу таасири астында мрамор бүртүкчөлөрүнүн күчү, анын ичинде ийкемдүү мүнөздөмөлөрдүн төмөндөшүнө алып келет.

**Баштапкы сөздөр:** тоо тектери, микротолкундуу талаалар, нурлануу убактысы, ысытуу температурасы, дан өлчөмү, структуралык өзгөрүүлөр, дислокациянын тыгыздыгы, дандардын сандык анализи, серпилгич мүнөздөмөлөрү.

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE MECHANISM OF CHANGES IN THE STRUCTURAL STATE OF ROCKS AS A RESULT OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC

Sultanalieva R.M., Konushbaeva A.T.  
KSTU named after I. Razzakova

Of all the types of energy used to change the physical and mechanical characteristics of rocks, the energy of a microwave electromagnetic field (microwave) is currently considered the most effective, which significantly changes the structural state of rocks. This article presents the results of experimental studies of structural changes in marble at a certain optimal time of microwave exposure using an Axio Imager light microscope and the ImageJ program was used to quantify the grains. It was revealed that microwave irradiation significantly affects the mechanical behavior and the nature of the deformation diagrams of the samples. 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.

Структурное состояние горных породах изменяются под воздействием физических полей. Различная реакция на внешнее

воздействие и анизотропия физических свойств компонентов обуславливают появление в полиминеральном агрегате породы, подвергающемся действию физического поля неоднородных напряжений. Генерируемые напряжения переводят отдельные элементы структуры в неустойчивое состояние, следствием которого является изменения дефектной структуры. Структурные состояния горных пород, в целом изменяются под воздействием физических полей. Под воздействием СВЧ полей рудные минералы нагреваются, а пустая порода в начале остается холодной. За счет этого 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 [1,2].

На специально подготовленных образцах сначала было исследовано исходное структурное состояние минерального вещества, затем было оказано воздействие СВЧ волн и выполнено повторное исследование параметров структурного состояния анализируемых образцов после внешнего воздействия.

Исследуемые образцы подвергались в разных времени воздействию СВЧ энергии: образец под номером 2-1 мин; 2 образец-3 мин.; 3-5 мин.; 4-7 мин., а 1-образец в исходном состоянии.

Оптические исследования проводились с использованием компьютерной обработки изображений, полученных на микроскопе марки Axio Imager. Специальная подготовка поверхности исследуемых образцов включала достижение совершенной полировки поверхности образцов до и после воздействия СВЧ волн.

Для изучения механизма изменения структурного состояния использовались образцы, представляющие исходные (генетические) состояния и после СВЧ облучения.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы из мрамора и известняка. Этапы анализа структурного состояния образцов 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.

Таблица 2.

Изменение параметров структурного состояния исследуемых горных пород при выборе режимов СВЧ электромагнитного воздействия

Параметр	Исходный образец		1 мин.		3 мин.		5 мин.		7 мин.	
	мрамор	известняк	мрамор	известняк	мрамор	известняк	мрамор	известняк	мрамор	известняк
Средние структурные напряжения $\sigma^s$ , ГПа	2,94	1,76	2,13	1,63	1,27	1,14	0,86	1,05	1,94	0,58
Размер блока мозаики $D_M$ , нм	64	61,3	62,8	59,1	51,5	58,2	54,3	55,2	59,4	58,3
Плотность дислокаций на границе блока мозаики $\rho_\sigma \cdot 10^{-11}$ , см <sup>-2</sup>	6,71	6,94	7,79	6,42	8,23	6,34	8,93	6,01	9,21	6,87
Плотность дислокаций внутри блока мозаики $\rho_\varepsilon \cdot 10^{-11}$ , см <sup>-2</sup>	1,06	1,27	1,18	1,23	1,72	1,28	1,93	1,34	1,97	1,39

Затем для каждого образца в исходном состоянии производилась съемка с помощью светового микроскоп марки Axio Imager.



Рис.1.Микроскоп «Axio Imager»

Для количественной оценки зерен была использована программа «ImageJ». «ImageJ», предоставленное для использования на сайте <http://rsb.info.nih.gov/ij/> [3]. Данная программа представляет собой платформонезависимый дистрибутив, написанный на языке JAVA и предназначенный для обработки, преобразований и широкого спектра аналитических процедур над цифровыми изображениями [4].

Для выделения границ зерен используем команду «Threshold», окрашивается в красный цвет. Используя данный инструмент можно автоматически или интерактивно настроить верхние и нижние значения порога для сегментирования области интерфейса и заднего фона изображения. При задании порога на изображении он, для удобства, выделяется красным цветом, а задний фон остается серым [5].

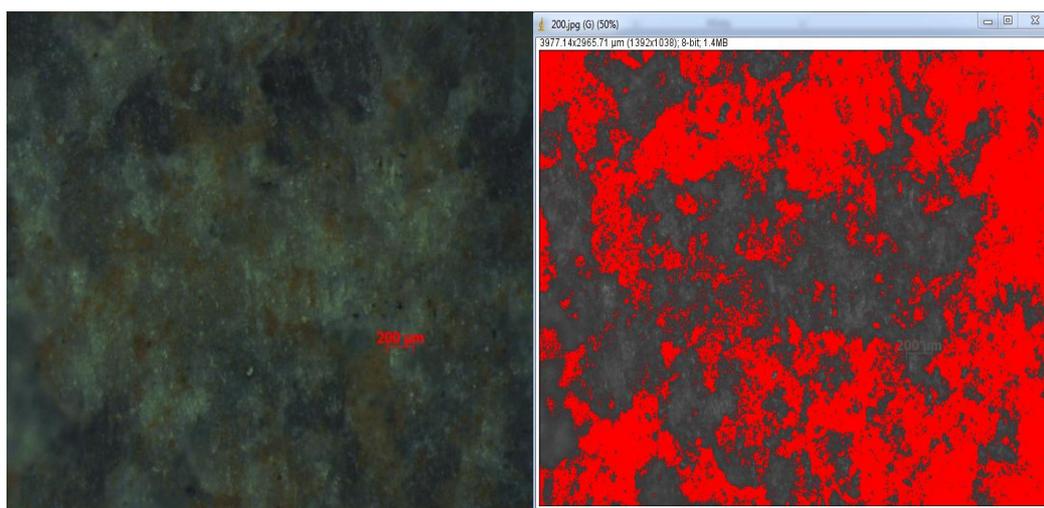


Рис.2. а) Исходная структура мрамора; б) Работа команды «Threshold».

В частности, на поверхности образца после в 1 мин. времени СВЧ воздействия существенных изменений в большинстве минеральных составляющих не обнаружено. Однако при более тщательном и детальном исследовании с максимальным увеличением на границах срастания некоторых зерен с известняком выявились очень тонкие, едва заметные нарушения сплошности. Как правило, они заметны не по всему

периметру границы зерна, а лишь с какой-нибудь одной стороны зерна. Появившиеся трещины частично повторяют контур зерна мрамора и не имеют продолжения в других минеральных образованиях (рис. 1. а, б). Явной закономерности в пространственной ориентации трещин не прослеживается.

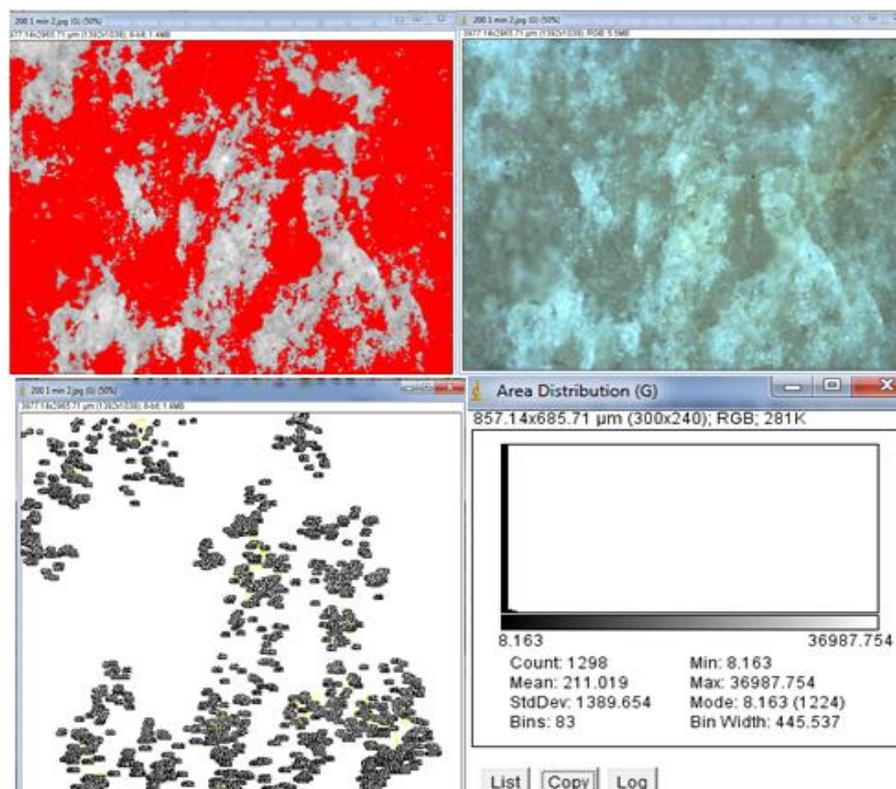


Рис.3. Структура образца мрамора (время облучения 1 мин) после обработки на Image J.

Лишь времени воздействия 3-5 минут наблюдается большая контрастность границы зерен мрамора и известняка, чем в исходном состоянии. Этот факт может свидетельствовать о начальной стадии образования пограничной трещины.

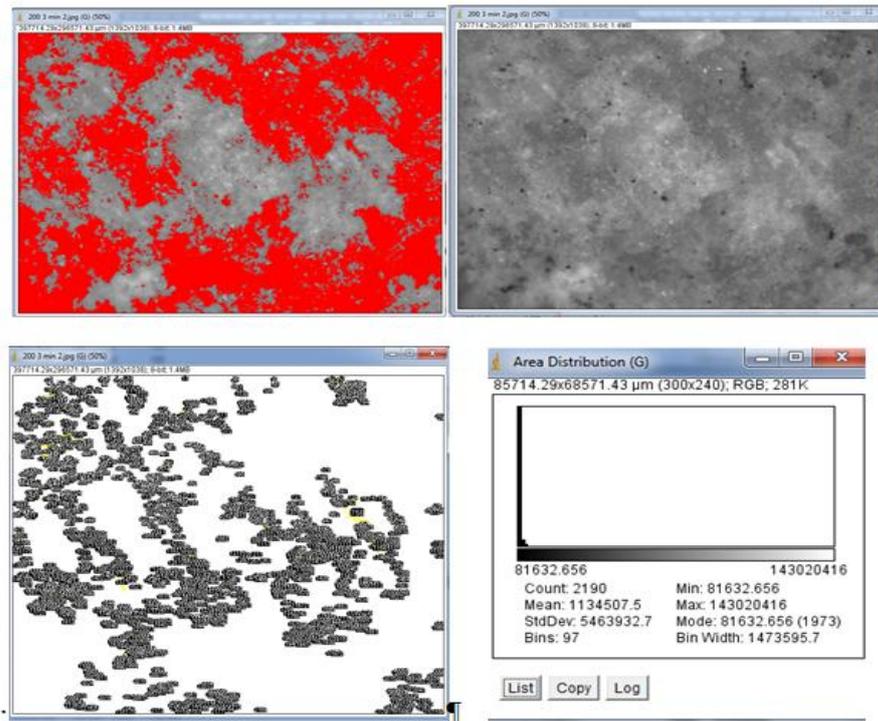


Рис.4. Структура образца мрамора (время облучения 3 мин) после обработки на Image J.

Гистограмма показывает, что всего 2190 значений. Минимальный размер зерен 81632,656 мкм. Максимальный размер 143020416 мкм.

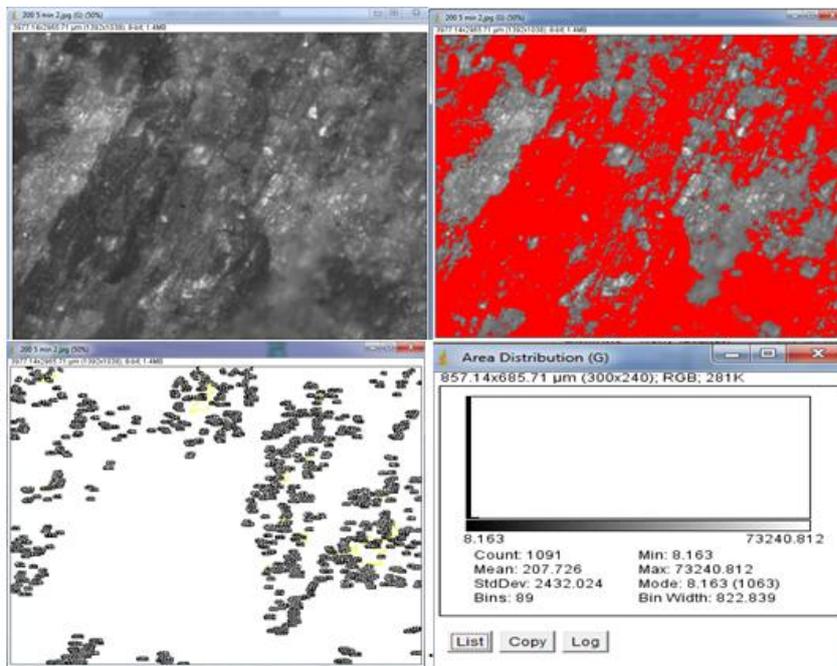


Рис.5. Структура образца мрамора (время облучения 5 мин) после обработки на Image J.

Гистограмма показывает, что всего 1091 значений. Минимальный размер зерен 8,163 мкм. Максимальный размер 73240,812 мкм.

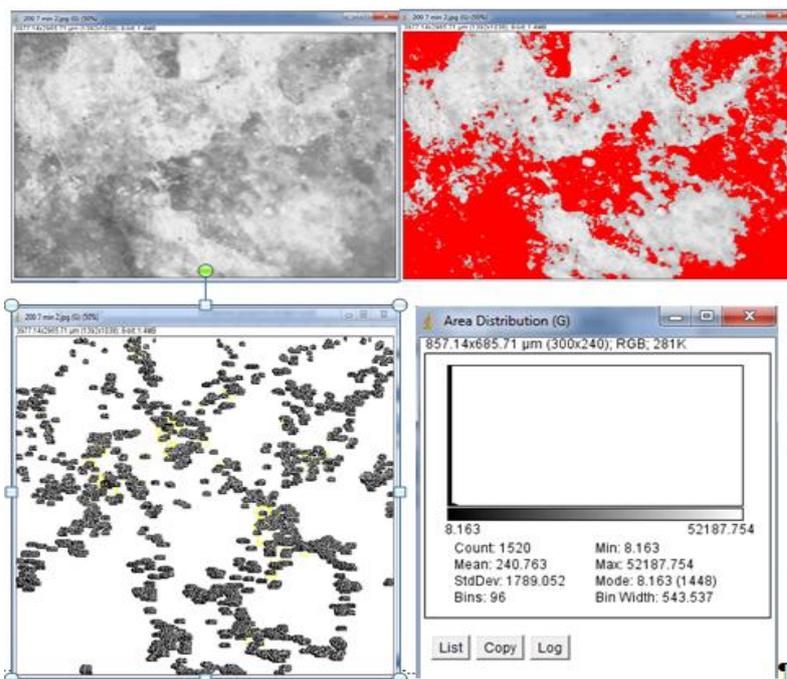


Рис.6. Структура образца мрамора (время облучения 7 мин) после обработки на Image J.

На основе результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1. Представленные в таблице, свидетельствуют об изменениях генетических структурных напряжений породообразующих минералов (за счет частичного нарушения сплошности межзеренных контактов), а также возрастании плотности дислокаций в зернах мрамора в результате воздействия СВЧ волн в момент времени 3 мин.

2. После воздействия 5-7 мин. СВЧ волной зернах мрамора иногда наблюдается появление или исчезновение внутренних рефлексов (рис. 4), что косвенно может свидетельствовать о возникших напряжениях внутри зерна рудного минерала или на его границе. Подобные напряжения, как известно, способны инициировать трещины при увеличении нагрузки.

3. После обработки на программу Image G, гистограмма значений показала следующие результаты: 1 минута - 1298 значений; 3 минуты -

1091 значений; 5 минут - 2190 значений; 7 минут - 1520 значений; при 3 минут времени воздействия СВЧ волн зерна имеют самое высокое раздробление, межзеренное расстояние близкое.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зильбершмидт М.Т. Механизм изменения структурного состояния горных пород при внешнем воздействии. «Физические процессы в горных породах» / Материалы всесоюзной конференции. М.: 1984.

2. Петров В.М. Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ / Информост, 2002.-С.35-41.

3. Источник: <https://catalogmineralov.ru/mineral/mramor.html>

4. Пантелеев В.Г., Егорова О.В., Клыкова Е.И. Компьютерная микроскопия. М.: Техносфера, 2005. 304с.

5. Анисович А. Г., Басалай А. В. Оценка ошибок оператора при количественном анализе структуры компьютерными методами. Литье и металлургия. 2012. - №4(68) – с.145-150.

6. Султаналиева Р.М. Принципы целенаправленного изменения механических свойств руд и минералов // Монография -Бишкек, 2014, 153 с.

7. Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. Определение температуры разупрочнения крепких руд от времени воздействия СВЧ волн // Материалы международной научно-практической конфер. «Новая наука: теоретический и практический взгляд»- Нижний Новгород, 2016, с. 21-25.