

УДК 550.32

DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9475

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И КРИОГЕННЫХ УСЛОВИЙ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРНЫХ ПОРОД

© 2017 В. Б. Заалишвили^{1,3}, д.ф.-м.н., проф., Т. Т. Магкоев^{1,2}, д.ф.-м.н., проф.,
Г. Э. Туаев¹, аспирант

¹Геофизический институт ВНЦ РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ,
ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru;

²Северо-Осетинский государственный университет им. К. Л. Хетагурова,
Россия, 362025, Владикавказ, ул. Ватутина, 44-46;

³Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова РАН,
364051, Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а

В статье рассматривается изменение внутренней структуры горной породы под влиянием механического и криогенного воздействия. Проведены три экспериментальных исследования с гранитными образцами горных пород. Первый эксперимент показал, что механическое воздействие изменяет кристаллическую структуру гранита, а второй эксперимент полностью сходится с теорией, и показывает, что горные породы разрушаются быстрее при воздействии с высокой скоростью, чем при постоянной либо плавно повышающейся нагрузке. В третьем эксперименте образцы гранита были погружены в жидкий азот (77,4 К) и жидкий гелий (4,2 К).

Ключевые слова: гранит, дифрактограмма, кристаллическая структура, одноосное сжатие, деформация, разрушение.

Введение

Анализ поведения горных пород при импульсных нагрузках показывает, что их реакция характеризуется такими особенностями, которые полностью определяются совокупностью возникающих внутренних изменений той или иной среды при высокоинтенсивных воздействиях на субмикронном уровне. Изменения на атомно-молекулярном уровне определяют физические и химические характеристики вещества. В настоящей статье приведены результаты исследования влияния на физико-химические характеристики горных пород механического воздействия и криогенных условий. Для исследования были выбраны образцы гранита.

Гранит (итал. *granito*, от лат. *granum* — зерно) магматическая плутоническая горная порода кислого состава, нормального ряда щёлочности. Состоит из кварца, плагиоклаза, полевого шпата и различных слюд. Граниты весьма широко распространены в континентальной земной коре. Эффузивные аналоги гранитов — риолиты. Плотность гранита — 2600 кг/м³, прочность на сжатие до 300 МПа. Температура плавления 1215–1260°C (2219–2300°F) [Петрографический кодекс России, 2008]. В условиях присутствия воды и давления температура плавления значительно снижается, достигая 650°C [Петрографический кодекс России, 2008]. Средний химический состав гранита: SiO₂ 68–73%, TiO₂ 0,1–0,6%, Al₂O₃ 12–15,5%, Fe₂O₃ 0,5–2,5%, FeO 0,5–3%, MgO 0,1–1,5%, CaO 1,5–4%, Na₂O 3–6%, K₂O 0,5–3% [www.instron.ru, 2013].

В связи с тем, что гранит имеет поликристаллическую структуру, имеется возможность исследовать образцы с помощью рентгеноструктурных методов анализа.

Целью нашего исследования, как уже отмечалось, являлось исследование влияния изменений на атомно-молекулярном уровне при интенсивных нагрузках (субмикронный уровень) на состояние горной породы (макроуровень). Для этого было проведено экспериментальное наблюдение поведения гранитного образца под большим давлением.

Экспериментальные исследования

В цехах ОАО «КЕТОН» гранитный образец в виде обломка со случайными формами подвергался сжатию под нагрузкой 800 кг на установке 2ГА-5В (рис. 1). После разрушения импульсным методом, образец доводился до пескообразного состояния, далее в течение 60 секунд оставался под достигнутой нагрузкой, после чего нагрузка снималась. Этого времени по нашим оценкам было достаточно для завершения структурных изменений вещества и перехода в новое состояние. Для получения более точных результатов за счет исключения влияния неподготовленной формы образца и связанного с этим случайного распределения концентраций прямых и касательных напряжений, необходимо соблюдать плоскопараллельность поверхностей сжатия.

На следующем этапе в Центре коллективного пользования «Физика и технологии наноструктур» на базе СОГУ им. К. Л. Хетагурова на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 были сняты две дифрактограммы до и после сжатия (рис. 2 и рис. 3).

Сравнивая полученные результаты, можно предположить, что изменения интенсивности пиков связаны с изменением внутренней структуры вещества. Если в первом случае мы видим два пика и (малое отношение сигнал/шум) ярко выраженные шумы (рис. 2), то после сжатия и разрушения горной породы на дифрактограмме (рис. 3) можно видеть смещение пиков влево при одновременном их сближении и уменьшении уровня шума. На рис. 2 и рис. 3 по оси абсцисс показано изменение угла падения, а по оси ординат интенсивность излучения.

Ещё один результат был получен на установке INSTRON 5967 (рис. 4) в Лаборатории композиционных материалов г. Дубна. Технические характеристики испы-



Рис. 1. Установка 2ГА-5В ($P = 320 \text{ кгс/м}^2$)

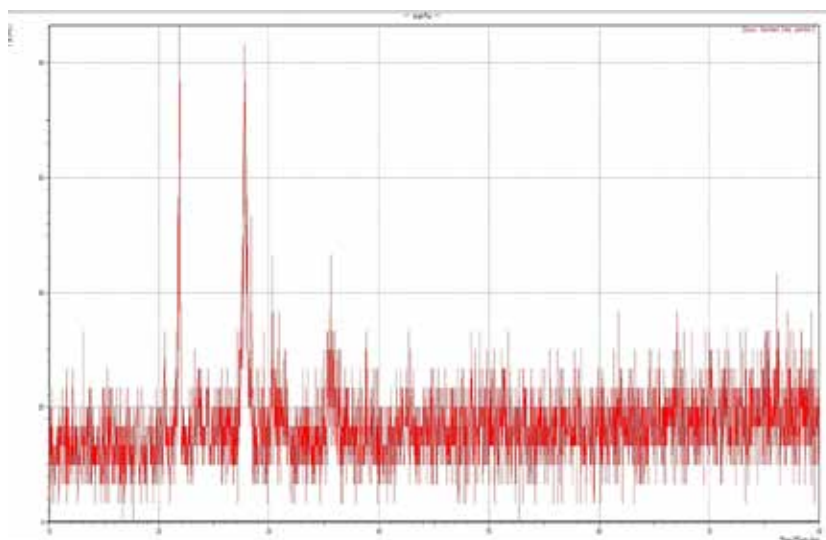


Рис. 2. Дифрактограмма гранита до сжатия

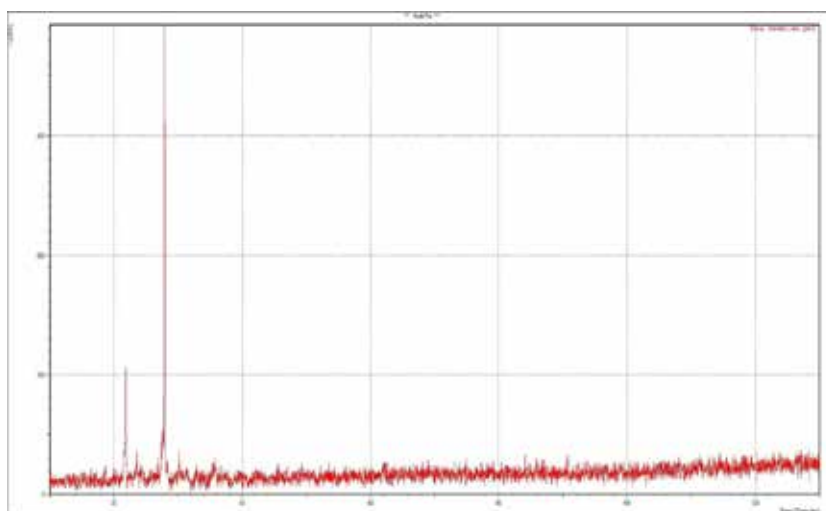


Рис. 3. Дифрактограмма гранита после сжатия.

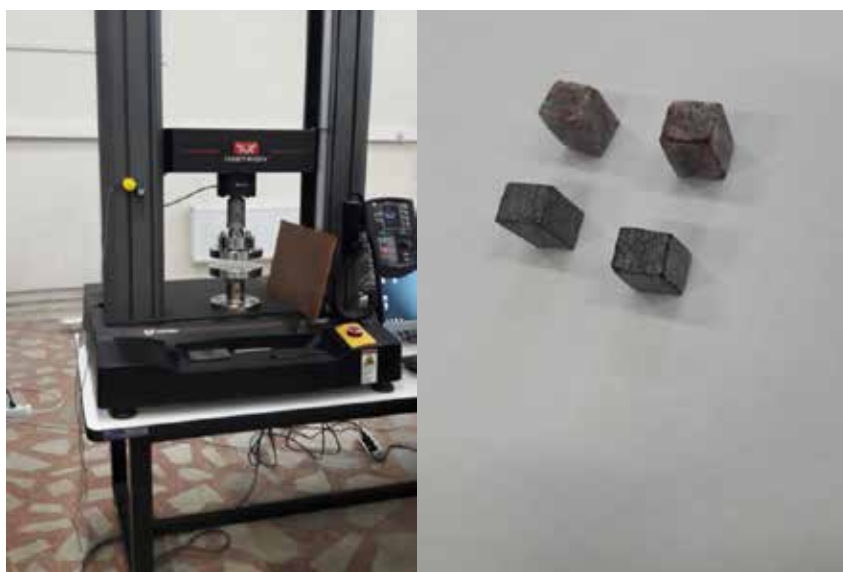


Рис. 4. Установка INSTRON

тательной машины INSTRON позволяют совершать нагрузки в 30 кН, при максимальной скорости 1000 мм/мин [www.instron.ru, 2013].

Для исследования были использованы образцы горной породы в виде красного и черного гранита, которые в данном эксперименте имели параллельные плоскости сжатия. Каждый образец представлял из себя параллелепипед. Всего было подготовлено 4 образца: два образца из красного индийского гранита (образцы 1 и 2), и два образца из чёрного китайского гранита (образцы 3 и 4). Различный цвет образцов подразумевает разный минералогический и химический состав образцов. Далее образцы были подвергнуты одноосному сжатию с усилиями разрушающей нагрузки и предела прочности каждого исследуемого образца.

Образец 1 подвергался статическому сжатию до появления первых механических повреждений, отражающихся на соответствующих графиках характерными импульсами, после чего нагрузка снималась. Необходимо отметить, что образец, на первый взгляд, сохранил свою форму, хотя последующий более детальный анализ выявил наличие микротрещин в поверхностных частях образца (рис. 5, кривая 1).

Следующий, образец 2 также был доведён до появления первого импульсного изменения реакции на нагрузку (рис. 5, кривая 2) и далее, при установившейся постоянной (статической) нагрузке образец подвергался дополнительному сжатию в течение 120 секунд, а далее был доведён до предельных деформаций, обусловивших появление, т. н. момента начала необратимого разрушения (рис. 5, кривая 3).

Образцы с 1 по 5

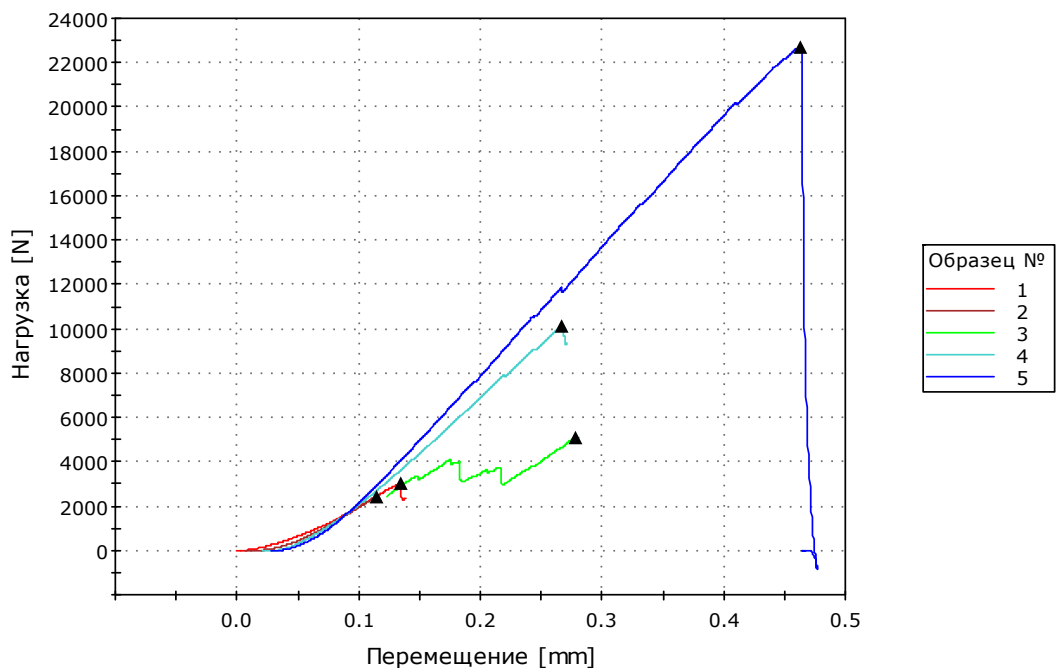


Рис. 5. Зависимость уровня нагрузки на образцы гранита от перемещения сжимающих областей

Следующий образец под номером 3 был также подвержен сжатию до появления первого импульсного изменения реакции на нагрузку. Далее нагрузка была полностью сброшена, т. е. последовательность экспериментальных действий была аналогична действиям, которые реализовывались при проведении эксперимента в случае образца 1 (рис. 5, кривая 4).

Следующий образец 4 при монотонно увеличивающемся уровне сжатия был доведён до полного разрушения (рис. 5, кривая 5).

Исходя из полученных результатов, можно отметить, что монотонная нагрузка на образец менее разрушительна, чем относительно быстро меняющаяся во времени нагрузка.

Описанные результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 5 (кривые 1-5) и сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Данные экспериментальных исследований

№ п/п	Маркировка образца	Длина [мм]	Ширина [мм]	Высота [мм]	Разрушающая нагрузка [Н]	Предел прочности [МПа]
1	1	11,30	10,60	20,1	3051,3	25,5
2	2	11,15	11,10	20,2	2451,7	19,8
3	2	11,15	11,10	20,2	5110,9	41,3
4	3	10,80	10,56	20,0	10108,3	88,6
5	4	11,35	11,04	20,0	22712,0	181,3

В третьем эксперименте исследовалось влияние низких температур на внутреннюю структуру гранита (криогенные условия). Всего исследовались: 5 образцов для воздействия азотом, 3 образца для воздействия гелием и один исходный образец:

1. granit0 — исходный образец при комнатной температуре
2. azot1-60 секунд воздействия жидким азотом
3. azot³-180 секунд воздействия жидким азотом
4. azot5-300 секунд воздействия жидким азотом
5. azot10-600 секунд воздействия жидким азотом
6. azot15-900 секунд воздействия жидким азотом
7. geliy1-60 секунд воздействия жидким гелием
8. geliy³-180 секунд воздействия жидким гелием
9. geliy6-360 секунд воздействия жидким гелием

Подготовка образцов была проведена в Лаборатории ФВЭ Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) г. Дубна.

Далее каждый образец исследовался с помощью дифрактометра Shimadzu XRD-7000 в Центре коллективного пользования «Физика и технологии наноструктур» СОГУ. Полученные дифрактограммы показали, что криогенное воздействие возможно оказывает «эффект холодного сжатия», то есть более холодная поверхность пытается сжать образец, в то время как более тёплое ядро проявляет обратные свойства.

Таблица 2.

**Значения углов для образцов, при которых достигается
максимальная интенсивность**

I	granit0 2θ	azot1 2θ	azot ³ 2θ	azot5 2θ	azot10 2θ	azot15 2θ	geliy1 2θ	geliy ³ 2θ	geliy6 2θ
max	26,20	26,69	20,98	20,82	26,56	28,14	27,74	28,22	27,40

Из данных таб. 2 видно, что при охлаждении происходит изменение текстуры породы, что подтверждается уменьшением угла, а при дальнейшем «насыщении» увеличением угла. Если же говорить о других интенсивностях на дифрактограммах других образцов, то можно отметить значительные отличия. При этом отмечается последовательная зависимость от времени воздействия. Образцы исследовались через 55 суток после воздействия, что говорит о необратимости процессов, происходящих в структуре породы при криогенном воздействии.

Выводы

В результате проведенного исследования показано, что статическое механическое воздействие порядка 3000-8000 Н приводит к изменению структуры образца с возможным изменением атомно-молекулярного состояния и строения исследуемого образцов. Криогенное воздействие также может быть причиной физико-химических изменений в горных породах. Полученные результаты можно расценивать как реализацию процесса механохимического синтеза, происходящего в горных породах в процессе сейсмической активности и оледенении пород, ключевым фактором которого следует считать изменение атомной кристаллической структуры горной породы.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность Лаборатории композиционных материалов г. Дубна за предоставленную возможность проведения эксперимента по сжатию гранитных образцов на испытательной машине Instron 5967.

Также отдельную благодарность авторы статьи выражают ведущему научному сотруднику ОИЯИ ЛФВЭ Генриху Малиновскому, за возможность подготовки образцов гранита для криогенных исследований горных пород.

Литература

1. Петрографический кодекс России. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. — С. 144. — 200 с. — 1 500 экз. — ISBN 978-5-93761-106-2
2. Instron — сайт разработчика — режим доступа: <http://www.instron.ru/~media/literature-library/products/2013/02/5960-series-dual-column-tabletop-5kn--50kn.pdf?la=en>

DOI: 10.23671/VNC.2017.1.9475

INFLUENCE OF MECHANICAL ACTION AND CRYOGENIC CONDITIONS ON THE PHYSICO — CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE ROCKS

© 2017 V. B. Zaalishvili^{1,3}, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., T. Y. Magkoev^{1,2}, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof., G. E. Tuaeв¹, Postgraduate student

¹Geophysical institute VSC RAS, Russia, 362002, Vladikavkaz, Markov street, 93a,
e-mail: cgi_ras@mail.ru;

²North-Ossetian state University after. K. L. Khetagurov, Russia, 362025, Vladikavkaz,
Vatutina str, 44-46;

³Integrated scientific research Institute after Kh. I. Ibragimov RAS, Russia, 364051,
Grozny, Staropromyslovsky highway, 21

A change in the internal structure of the rock under the effect of the mechanical and cryogenic action is examined. Three experimental studies with the granite models of the rocks were carried out. The first experiment showed that the mechanical action change the crystal structure of granite, and the second experiment completely converges with the theory, and it shows that the rocks are destroyed more rapidly under the influence with the higher speed, than with a constant or smoothly risen load. In the third experiment the models of granite were submerged in liquid nitrogen (77,4 K) and liquid helium (4,2 K).

Keywords: granite, diffractogram, crystal structure, axial compression, deformation, destruction.