

ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРАНИТА ПОСЛЕ ЕГО ОБРАБОТКИ УСКОРЕННЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Виктор Иванович Ростовцев

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383)205-30-30, доп. 167, e-mail: benevikt@misd.ru

Ранее в работах ИГД СО РАН экспериментально была установлена оптимальная доза обработки гранита ускоренными электронами – 10 кГр, при которой уменьшаются: прочность при одноосном сжатии с 68,33 до 35,08 МПа и модуль деформации с 13,19 до 7,04 ГПа. Такая обработка позволяет снизить энергию разрушения кернов гранита сжатием с 7,68 до 3,06 Дж, а энергию дробления – с 700,42 до 470,88 Дж. Важным для технологического использования является динамика изменения свойств минеральных компонентов от времени после их обработки ускоренными электронами. Цель исследований – изученные временных изменений свойств гранита, с которым связаны месторождения таких полезных элементов, как Au, Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Bi и др. Выполненные комплексные экспериментальные исследования на примере гранита показали, что после его обработки пучком высокоэнергетических электронов при увеличении поглощенной дозы скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются и снова уменьшаются. Полученные закономерности изменения свойств гранита связаны с его дефектностью, обусловленной памятью исследованной горной породы. Наиболее существенные изменения в величинах скоростей продольных и поперечных волн в обработанных ядрах гранита с течением времени до 5360 часов после обработки наблюдаются при значении поглощенной дозы 10 кГр. Установленный факт увеличения скорости продольных и поперечных волн от времени после обработки ядер гранита при дозе более 10 кГр может свидетельствовать о снижении количества дефектов и возможного упрочнения минерального сырья. Научная новизна заключается в установлении временных изменений свойств гранита и возможности использования эффекта разупрочнения минерального сырья при обогащении.

Ключевые слова: разупрочнение, ускоренные электроны, скорость продольных и поперечных волн, временные изменения физико-механических и акустических свойств гранита, дефектность и память горных пород.

STUDIES OF TIME CHANGES OF PHYSICAL, MECHANICAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF GRANITE AFTER TREATMENT OF IT BY ACCELERATED ELECTRONS

Victor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, D. Sc., Leading Researcher Laboratory for Mineral Beneficiation and Technological Ecology, phone: (383)205-30-30, extension 167, e-mail: benevikt@misd.ru

Previously in works of Chinacal Institute of Mining SB RAS, optimal dose of accelerated electron treatment of granite – 10 kGy is established experimentally, where unconfined compressive strength is reduced from 68.33 MPa up to 35.08 MPa and stress-strain modulus is reduced from

13.19 GPa up to 7.04 GPa. The treatment allows to reduce of destruction energy of granite core-samples by compression from 7.68 up to 3.06 J and crushing energy from 700.42 J up to 470.88 J. Dynamic of time change of mineral components properties after treatment of them by accelerated electrons is important for technological using. Research objective is studying of time change of properties of granite related to deposits of minerals such as Au, Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Bi and others. Carried out complex experimental investigations in the context of granite have shown that velocities of longitudinal and shear waves decrease then increase and decrease again after treatment of granite by beam of high energetic electrons when acquisition dose increases. Obtained regularities of changing of granite properties are related to its defect structure, which is specified with memory of studied rock. The most significant changes in the velocities of the waves in the treated granite core-samples with time flow to 5360 hours after the treatment is observed when value of acquisition dose reaches 10 kGy. Established fact of increasing of the wave velocities from time after the treatment at dose more than 10 kGy can indicate the reduction of defect number and possible consolidation of mineral raw materials. Scientific novelty is establishment of time changes of granite properties and possibility of using of effect of mineral raw material softening during beneficiation.

Key words: softening, accelerated electrons, velocities of longitudinal and shear waves, time changes of physical, mechanical and acoustic properties of granite, defect structure and rock memory.

Введение

В настоящее время развитие минерально-сырьевой базы нашей страны связано с масштабным вовлечением в разработку месторождений труднообогатимых руд, а также с освоением техногенных минеральных образований. Эта тенденция, в свою очередь, обуславливает как значительные потери промышленно ценных компонентов на стадиях добычи и переработки минерального сырья, так и высокие эксплуатационные и капитальные затраты на производство конечной продукции.

Технологии переработки минерального сырья в последнее время многократно усложнились ввиду перехода на труднообогатимые тонковкрапленные и особенно бедные руды, в которых целевые минералы переизмельчаются и теряются со шламами. До 40 % потерь ценных компонентов в процессах первичной переработки связано со сrostками и до 35 % – с тонкими частицами крупностью менее 10 мкм [1]. Задача рудоподготовки состоит в приближении крупности частиц до размеров кристаллов минералов в рудах перспективных и разрабатываемых месторождений цветных металлов, олова, редких и редкоземельных элементов. Важным является сохранение кристаллической структуры полезных компонентов. В технологиях подготовки ряда руд применяют оборудование для тонкого (менее 20 мкм) и сверхтонкого (менее 7 мкм) измельчения [2]. Энергозатраты в процессах рудоподготовки достигают 50 кВт·ч/т и выше.

В [3, 4] подчеркивается, что технологические свойства минералов зависят от их конституции и генезиса, обуславливающих определенную степень контрастности свойств срастающихся минералов, и возможности их изменения под влиянием различных воздействий. Максимально полную информацию о минеральном составе и структурных параметрах минералов в перерабатываемом

минеральном сырье можно получить с использованием данных технологической минералогии. Минеральный и гранулометрический состав определяют крупность дезинтеграции минерального сырья и возможность раскрытия минералов в технологических процессах.

Следует отметить, что выдающийся российский ученый, член-корреспондент АН СССР И.Н. Плаксин считал [5], что одним из важнейших направлений в процессах обогащения является поиск таких энергетических воздействий, которые существенно повысят полноту и комплексность использования минерального сырья. Он одним из первых обосновал эффективность использования внешних энергетических воздействий в процессах обогащения полезных ископаемых. Указанное направление поддерживается его учениками и сторонниками [6-8].

Результаты исследований, выполненных в ряде Институтов нашей страны, в том числе и в ИГД СО РАН [9-11], указывают на возможность повышения раскрываемости сростков труднообогатимого минерального сырья и улучшения технологических показателей его обогащения за счет предварительной обработки потоком ускоренных электронов, позволяющей уменьшать прочность минералов и горных пород. Анализ проб минерального сырья различных месторождений показывает, что они, как правило, полиминеральные и большая их часть представлена порообразующими минералами и горными породами, например, такими как известняк, роговик, гранит.

В работе [12] экспериментально была установлена оптимальная доза обработки гранита ускоренными электронами – 10 кГр, при которой снижаются: прочность при одноосном сжатии с 68,33 до 35,08 МПа и модуль деформации с 13,19 до 7,04 ГПа. Такая обработка позволяет снизить энергию разрушения кернов гранита сжатием с 7,68 до 3,06 Дж, а энергию дробления – с 700,42 до 470,88 Дж. Важным для технологического использования является динамика изменения свойств минеральных компонентов от времени после их обработки ускоренными электронами. Цель настоящих исследований – изученные временных изменений свойств гранита, с которым связаны месторождения таких полезных элементов, как Au, Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Bi и др.

Методы и материалы

Определение физико-механических свойств гранита осуществлялось на образцах кернов правильной цилиндрической формы в соответствии с действующими стандартами и методиками на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку. Диаметр (d) образцов составлял порядка 30 мм; высота образцов (h) – 60 мм; отношение высоты (h) к диаметру (коэффициент формы h/d) в среднем для испытанных образцов составляло 2, что соответствует требованиям ГОСТ 21153.2-84. Определение деформационных свойств горных пород производилось согласно требованиям [13-15].

Обработка подготовленных кернов образцов осуществлялась пучком ускоренных электронов на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной

физики СО РАН в соответствии с заданными дозами при энергии электронов 2.4 МэВ.

Измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в кернах гранита осуществлялись по методике, приведенной в ГОСТ 21153.7-75 [15]. Схема стенда для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в атмосферных условиях приведена на рис. 1. Оборудование стенда состоит из нижнего 1 и верхнего 2 оснований и каркаса 3, во внутреннем пространстве которого располагается керновый образец 4 между опорными поверхностями оснований. Каркас состоит из нижнего 5 и верхнего 6 направляющих, соединенных между собой опорными колоннами 7 и гайками 8. Во внутреннем пространстве оснований расположены подпружиненные датчики 9 и 10. Датчики посредством линии связи 11 и 12 соединены с блоком формирования импульсов и блоком приема сигналов соответственно.

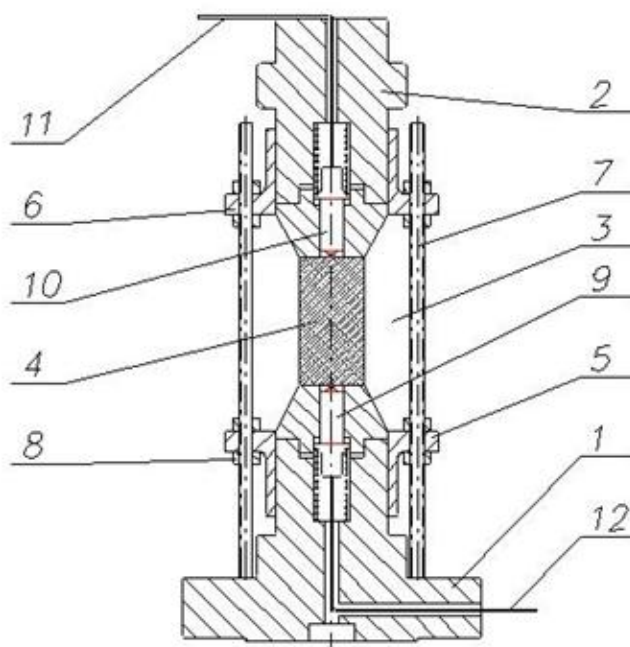


Рис. 1. Стенд для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в атмосферных условиях (описание в тексте)

Для определения скоростей распространения продольной и поперечной волн керновый образец устанавливался между опорными поверхностями нижнего и верхнего оснований, в которых датчики с помощью пружин прижимались к торцевым поверхностям кернового образца. Совпадение осей датчиков достигалось конструкцией каркаса. Длина кернового образца L измерялась с погрешностью измерения 0,1 мм.

На рис. 2 показаны типичные виды сигналов. Осциллограммы сигналов записаны при сквозном прозвучивании образца керна диаметром 30 мм и длиной

60 мм парой одинаковых датчиков. На рис. 2, а приведена осциллограмма от датчиков с продольными колебаниями, а на рис. 2, б – от датчиков с поперечными колебаниями. При исследовании кернов применялась рабочая частота ультразвукового диапазона 200 кГц. Расчеты по определению скоростей распространения продольных $V_{\text{прод}}$ и поперечных $V_{\text{поп}}$ волн в исследованных образцах гранита, его модуля упругости и коэффициента Пуассона производились по формулам, приведенным в [11, 13-15].

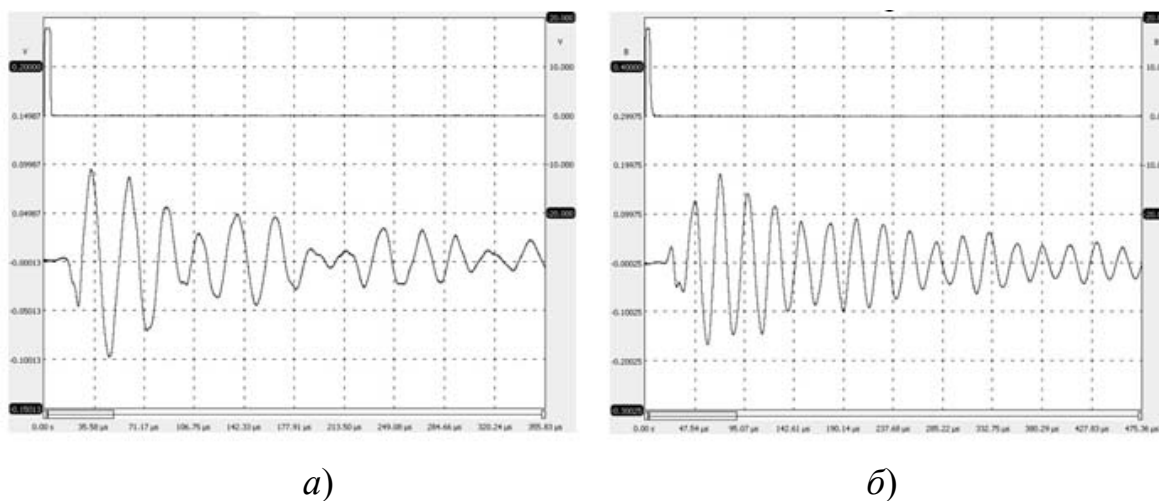


Рис. 2. Осциллограммы сигналов от датчиков:
а) с продольными колебаниями; б) с поперечными колебаниями

Результаты

Основные результаты исследований по изучению влияния обработки ускоренными электронами кернов гранита на его механические и акустические свойства, в том числе через различные промежутки времени после воздействия ускоренными электронами, приведены в табл. 1, 2.

Обсуждение

Из табл. 1 следует, что средние скорости распространения продольных $V_{\text{прод}}$ и поперечных $V_{\text{поп}}$ волн в исходных ядрах гранита составили 3989,79 и 2376,29 м/с. Эти показатели не противоречат приведенным в [15]. В этой же таблице показаны результаты тестирования кернов гранита после их обработки ускоренными электронами. С увеличением величины поглощенной дозы до 20 кГр скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются и снова уменьшаются. Для обработанных при дозе 5 кГр образцов средние скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно равны 3886 и 2337 м/с, а при дозе 10 кГр – 4093,3 и 2437,3 м/с. Результа-

ты исследований, приведенные в табл. 1, показывают также, что в результате обработки кернов гранита потоком высокоэнергетических ускоренных электронов изменяются модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Таблица 1

Результаты механического и динамического тестирования
кернов гранита, обработанных потоком
высокоэнергетических ускоренных электронов

Об-разец	Характеристики образца				Скорость, м/с		Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
	Длина мм	Диаметр мм	Вес, г	Плотность, кг/м ³	Продольная	Поперечная		
Керны без обработки ускоренными электронами								
1-14	59,45	29,54	103,64	2545,79	3989,79	2376,29	35,28	0,2242
Керны обработаны ускоренными электронами при поглощенной дозе 5 кГр								
3	60,7	29,4	104,0	2525	4223	2549	39,81	0,2135
4	59,9	29,5	104,0	2542	3892	2320	33,49	0,2245
5	56,9	29,6	97,0	2479	3543	2142	27,56	0,2121
среднее	59,17	29,5	101,7	2515,3	3886	2337	33,62	0,2167
Керны обработаны ускоренными электронами при поглощенной дозе 10 кГр								
6	59,5	29,5	102,0	2509	4114	2473	37,35	0,2172
7	57,0	29,5	97,0	2491	4112	2463	36,88	0,2202
8	60,0	29,6	104,0	2520	4054	2376	35,24	0,2382
среднее	58,83	29,53	101,0	2506,7	4093,3	2437,3	36,49	0,2252
Керны обработаны ускоренными электронами при поглощенной дозе 15 кГр								
9	60,5	29,6	104,0	2499	3905	2339	33,38	0,2202
10	60,7	29,6	105,0	2515	3986	2479	36,61	0,1848
11	58,8	29,5	101,0	2514	4055	2430	36,23	0,2198
среднее	60,0	29,57	103,3	2509,3	3982	2416	35,41	0,2082
Керны обработаны ускоренными электронами при поглощенной дозе 20 кГр								
12	58,5	29,5	100,0	2502	4082	2435	36,31	0,2239
13	59,0	29,5	100,0	2481	3858	2309	32,29	0,2210
14	60,0	29,6	103,0	2496	3886	2222	30,99	0,2571
среднее	59,17	29,53	101,0	2493	3942	2322	33,20	0,2340

Таблица 2

Результаты определения свойств образцов кернов гранита,
обработанных потоком ускоренных электронов,
через различные промежутки времени

Номер образца	Поглощенная доза, кГр	Размер образца, $d \times l$, мм	Атмосферные условия			
			Скорость волн, м/с		Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
			продольных	поперечных		
Измерения выполнены непосредственно после обработки						
1-14	0	29,54x59,45	3989,79	2376,29	35,28	0,2242
3-5	5	29.5x59,17	3886	2337	33,62	0,2167
6-8	10	29.53x58,83	4093,3	2437,3	36,49	0,2252
9-11	15	29.57x60.0	3982	2416	35,41	0,2082
12-14	20	29.53x59,17	3942	2322	33,20	0,2340
Измерения выполнены через 200 часов после обработки						
1-2	0	29,55x60,4	3974,5	2294,5	32,80	0,2500
3-5	5	29.5x60,17	3924,3	2350	33,86	0,2206
6-8	10	29.53x58,83	4152	2463	37,08	0,2280
9-11	15	29.57x60.0	4061,3	2433	36,04	0,2201
12-14	20	29.53x59,17	3990	2344,3	33,81	0,2361
Измерения выполнены через 1856 часов после обработки						
1-2	0	29,55x60,4	3904,5	2323,5	33,095	0,22585
3-5	5	29.5x59,17	3927	2396	34,97	0,2038
6-8	10	29.53x58,83	4248	2514	38,83	0,2298
9-11	15	29.57x60.0	4132,7	2492,7	37,88	0,2140
12-14	20	29.53x59,17	4054,7	2397,3	35,32	0,2311
Измерения выполнены через 5360 часов после обработки						
1-2	0	29,55x60,4	3950	2260,5	32,14	0,25
3-5	5	29.50x59,17	4157	2401,7	36,29	0,25
6-8	10	29.53x58,83	4331,7	2519,3	39,46	0,24
9-11	15	29.57x60.0	4292	2542	39,87	0,23
12-14	20	29.53x59,17	4124,3	2420	36,35	0,23

Изменения характеристик гранита после его радиационной обработки связаны с таким фундаментальным свойством горных пород, как память и ее разнообразными проявлениями, обусловленными своим существованием явлению дефектности [16]. Сложность и разнообразие дефектов, характеризующих

сложную картину разрушения горных пород, неоднократно отмечалась рядом ученых [16, 17]. Дефектность горных может рассматриваться на нескольких различных масштабных уровнях. Дефекты наиболее низкого уровня – это точечные дефекты кристаллической решетки – вакансии и атомы внедрения. Более высокий уровень дефектов в зернах – линейные дефекты – дислокации. Зернистая структура породы обуславливает наличие дефектов типа границ раздела зерен, отличающихся как взаимной ориентацией осей, так и физическими свойствами. В случае исследований на образцах кернов и небольших участках массива различают более высокий уровень дефектов, связанный с микро- и макротрещинами. В формирование памяти вносят вклад дефекты всех указанных уровней.

Из табл. 2 следует, что скорости продольных и поперечных волн в необработанных кернах гранита с течением времени существенно не изменяются. Наиболее существенные изменения в величинах скоростей продольных и поперечных волн в обработанных ускоренными электронами кернах гранита с течением времени наблюдаются при значении поглощенной дозы 10 кГр. Если непосредственно после обработки их значения составляют 4093,3 и 2437,3 м/с; то спустя 200; 1856 и 5360 часов – они равны для скорости продольных волн 4152; 4248 и 4331,7 м/с; а для скорости поперечных волн – 2463; 2514 и 2519,3 м/с. Модуль упругости для кернов гранита в соответствии с таблицей 2 принимает максимальные значения также при значении поглощенной дозы 10 кГр независимо от времени.

Заключение

Установленный факт увеличения скорости продольных и поперечных волн от времени после обработки кернов гранита может свидетельствовать о снижении количества дефектов и возможного упрочнения минерального сырья. Указанные экспериментально обнаруженные временные особенности поведения гранита после обработки ускоренными электронами следует учитывать в процессах рудоподготовки и переработки труднообогатимого тонковкрапленного минерального сырья.

Работа выполнена в рамках проекта НИР, № госрегистрации АААА-А17-117092750073-6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В.А., Козлов А.П. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения-2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 3–6.
2. Чантурия В.А., Маляров П.В. Обзор мировых достижений и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции минерального сырья при обогащении полезных ископаемых / Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы Международного совещания Плак-

синские чтения-2012, г. Петрозаводск, 10-14 сентября 2012 г. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – С. 3–10.

3. Котова О.Б., Ожогина Е.Г., Рогожин А.А. Интервенция минералогии в технологии переработки труднообогатимых полезных ископаемых / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения-2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 10–13.

4. Пирогов Б.И. Природа и эволюция технологических свойств минералов / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения-2017): материалы Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – С. 28–31.

5. Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш., Чантурия В. А., Якушкин В. П. О влиянии ионизирующих излучений на флотационные свойства некоторых минералов // И. Н. Плаксин. Обогащение полезных ископаемых. Избранные труды. – М.: Наука, 1970. – С. 292–300.

6. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. – С. 107–128.

7. Bochkarev G. R., et al. Prospects of electron accelerators used for realizing effective lowcost technologies of mineral processing, Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21–26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, Vol. 1. – P. 231–243.

8. Кондратьев С.А. и др. Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 5. – С. 187–202.

9. Ростовцев В. И., Кондратьев С. А., Бакшеева И. И. Совершенствование обогащения медно-никелевых руд на основе энергетических воздействий // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 123–130.

10. Ростовцев В. И. О роли радиационной модификации минерального сырья в процессах рудоподготовки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2018. – Т. 5. – № 1. – С. 207–213.

11. Кондратьев С.А., Ростовцев В.И., Бакшеева И.И. Исследования прочностных свойств керновых образцов горных пород с применением их обработки пучком высокоэнергетических электронов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. - № 4 - С. 168-176.

12. Исследования энергии разрушения керновых образцов гранита, обработанных ускоренными электронами / В. И. Ростовцев, С. А. Кондратьев, О. Р. Кулагин, Р. А. Кулагин, Б. Б. Сиволап // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. Т. 5. – С. 188–193.

13. ГОСТ 28985–91. Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.

14. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

15. ГОСТ 21153.7–75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.

16. Лавров А.В., Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: изд-во МГГУ, 2004. – 436 с.

17. Шемякин Е.И. Хрупкое разрушение горных пород / Горный вестник.–1998. – № 2. – С. 10–16.

© В. И. Ростовцев, 2019