

УДК 622.7

**ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН
В ГРАНИТЕ ПОСЛЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ
И ПЕРСПЕКТИВЫ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ РУДОПОДГОТОВКЕ**

В. И. Ростовцев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: benevikt@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Выявлены закономерности по влиянию поглощенной гранитом дозы при радиационной обработке на скорости упругих волн. Показано, что наиболее существенные изменения скорости продольных и поперечных волн в обработанных ядрах гранита наблюдаются при дозе 10 кГр. Оценку энергозатрат на разрушение и дробление можно проводить с использованием испытаний на разрушение при одноосном нагружении. Радиационная обработка ядер гранита дозой 10 кГр позволяет снизить энергию разрушения одноосным сжатием с 7.68 до 3.06 Дж, а энергию дробления — с 700.42 до 470.88 Дж. Полученный результат важен для совершенствования процессов рудоподготовки минерального сырья.

Скорости упругих волн в граните, радиационная обработка гранита, рудоподготовка, оценка энергетических затрат на разрушение и дробление

DOI: 10.15372/FTPRPI20190219

Технология переработки минерального сырья в последнее время многократно усложнилась 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 доведении 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. Энергозатраты в процессах рудоподготовки достигают 50 кВт·ч/т и выше.

С целью уменьшения потерь полезных компонентов и сокращения расходов электроэнергии представляется перспективным использование немеханических энергетических воздействий, позволяющих преодолеть физическую упорность руд и обеспечить их селективную дезинтеграцию без излишнего переизмельчения [1–6]. Высокая эффективность энергетических методов в процессах обогащения подтверждается исследованиями ученых Канады, Японии, ЮАР, Китая и др. Одним из первых обосновал эффективность использования внешних энергетических воздействий выдающийся российский ученый, член-корреспондент АН СССР И. Н. Плаксин [7].

В [8–10] указана возможность повышения раскрываемости сростков труднообогатимого минерального сырья и улучшения технологических показателей его обогащения за счет предварительной обработки потоком ускоренных электронов, позволяющей разупрочнять минералы и горные породы. Анализ проб минерального сырья различных месторождений показывает, что они, как правило, полиминеральные и большая их часть представлена породообразующими минералами и горными породами, такими как известняк, роговик, гранит.

Цель исследований — изучение временных изменений скоростей распространения упругих волн в граните после его обработки ускоренными электронами и оценка энергозатрат на разрушение и дробление при рудоподготовке минерального сырья.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Граниты — наиболее важные породы земной коры. С ними связаны месторождения таких полезных элементов, как Au, Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Bi и др. Граниты содержат в своем составе 60–65 % калиевого полевого шпата, 25–35 % кварца и 5–10 % слюды [11]. Калиевый полевой шпат входит в состав многих полиметаллических руд, кварц — главная составная часть золото-, железосодержащих и других руд.

Определение упругих свойств гранита выполнялось на образцах кернов правильной цилиндрической формы в соответствии с действующими стандартами и методиками на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку. Диаметр d образцов составлял 30 мм, высота h — 60 мм, отношение $h/d=2$, что соответствует требованиям ГОСТа. Определение деформационных свойств горных пород проводилось согласно требованиям [12–14]. 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.

Для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн использовался комплект оборудования, разработанный и изготовленный в ИГД СО РАН. В экспериментальных исследованиях применялись сертифицированные датчики S1802-0.05A0D4PU производства фирмы “Акустические Контрольные Системы”, для преобразования ультразвуковых колебаний — пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и малой длительностью импульсной характеристики.

Неметаллические материалы (горные породы) обладают более сильной зависимостью затухания ультразвука от частоты, чем металлы. Особенно быстро затухание растет с частотой в крупноструктурных неметаллических материалах. В этой связи для неразрушающего контроля таких материалов используются нижние частоты ультразвукового диапазона. При исследовании кернов гранита применялась рабочая частота 200 кГц.

Накопленный опыт в области изучения акустических свойств горных пород при различных режимах нагружения свидетельствует о высокой информативности подобных исследований и высокой степени проработки методического и аппаратного обеспечения лабораторных экспериментов [15]. Расчеты по определению скоростей распространения продольных V_p и поперечных V_s волн в исследованных образцах гранита проводились по формулам, приведенным в [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Объектом исследований служили образцы гранита. Усредненные результаты экспериментального определения физико-механических свойств гранита в исходном состоянии следующие: плотность $\rho = 2545 \text{ кг/м}^3$; скорость распространения продольных упругих волн

$V_p = 3990$ м/с, поперечных $V_s = 2376$ м/с; статический модуль упругости $E_{st} = 13.2$ ГПа, динамический $E_d = 35.3$ ГПа; статический коэффициент Пуассона $\mu_{st} = 0.19$, динамический $\mu_d = 0.22$; предел прочности при сжатии $\sigma_c = 68.3$ МПа.

Изучено влияние поглощенной кернами гранита дозы при обработке ускоренными электронами на скорость распространения упругих волн в зависимости от времени. В работе приняты дозы: 5, 10, 15 и 20 кГр. Диапазон времени 0–225 сут. По полученным экспериментальным данным построены сглаживающие кривые. Соответствующие уравнения и достоверность аппроксимации R^2 приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Временные зависимости скоростей продольных и поперечных упругих волн для кернов гранита, обработанных потоком высокоэнергетических ускоренных электронов, и достоверность аппроксимации R^2

Доза, кГр	Уравнение регрессии и достоверность аппроксимации R^2	
	для скорости продольных волн, м/с	для скорости поперечных волн, м/с
0	$V_p = 0.0063t^2 - 1.58t + 3988.5$; $R^2 = 0.9987$	$V_s = -0.0004t^2 - 0.2676t + 2339.1$; $R^2 = 0.5517$
5	$V_p = 0.0054t^2 - 0.0739t + 3903.7$; $R^2 = 0.9838$	$V_s = -0.0031t^2 + 0.9811t + 2339.3$; $R^2 = 0.9959$
10	$V_p = -0.0057t^2 + 2.2439t + 4111.8$; $R^2 = 0.9744$	$V_s = -0.0041t^2 + 1.227t + 2444.4$; $R^2 = 0.9723$
15	$V_p = -0.0027t^2 + 1.8476t + 4011.5$; $R^2 = 0.9602$	$V_s = -0.0028t^2 + 1.1777t + 2419.4$; $R^2 = 0.9972$
20	$V_p = -0.0038t^2 + 1.5814t + 3958.2$; $R^2 = 0.9662$	$V_s = -0.0034t^2 + 1.1722t + 2327.8$; $R^2 = 0.9871$

На рис. 1 приведены зависимости изменения распространения скоростей V_p и V_s упругих волн для гранита в зависимости от времени для исходных образцов и образцов после радиационной обработки при дозах 10 и 20 кГр.

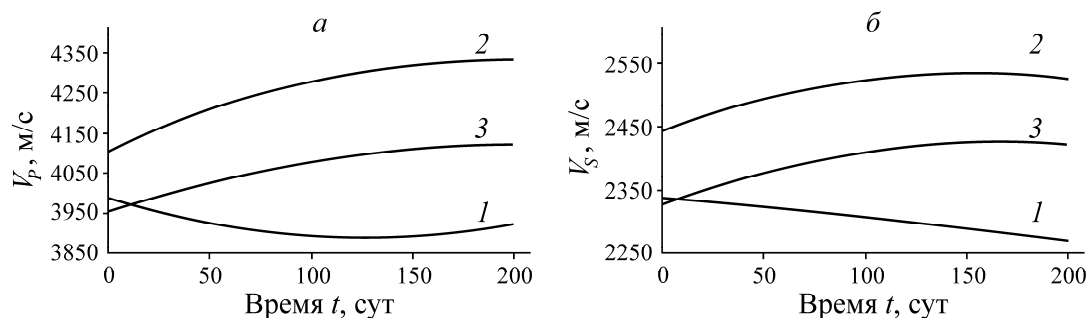


Рис. 1. Временные зависимости изменения скорости продольных V_p (а) и поперечных V_s (б) упругих волн для гранита: 1 — без обработки; 2, 3 — после радиационной обработки при дозах 10 и 20 кГр соответственно

Изменения характеристик гранита после его радиационной обработки связаны с таким фундаментальным свойством горных пород, как память, и ее разнообразными проявлениями, обусловленными явлением дефектности [16]. Сложность и разнообразие дефектов, характеризующих сложную картину разрушения горных пород, отмечались в [16, 17]. Дефектность горных пород может рассматриваться на 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, в том числе и гранита, обуславливает наличие дефектов типа границ раздела зерен, отличающихся как взаимной ориентацией осей, так и физическими свойствами. В исследованиях 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.

Анализ рис. 1 показывает, что скорости продольных и поперечных волн в необработанных кернах гранита с течением времени существенно не изменяются (кривые 1). Для скорости продольных волн отмечается сначала ее уменьшение, затем увеличение. Скорость поперечных волн в образцах гранита уменьшается. Наиболее существенные изменения скоростей продольных и поперечных волн в обработанных ускоренными электронами кернах гранита с течением времени наблюдаются при значении поглощенной дозы 10 кГр (кривые 2).

Обработка гранита ускоренными электронами позволяет изменять его акустические свойства. Установленный факт увеличения скорости продольных и поперечных волн после обработки кернов гранита может свидетельствовать о снижении количества дефектов и возможном упрочнении минерального сырья. Экспериментально обнаруженные временные особенности поведения гранита после обработки ускоренными электронами следует учитывать в процессах рудоподготовки и переработки труднообогатимого тонковкрапленного минерального сырья. Как следует из рис. 1, скорость распространения упругих волн в граните минимальна при $t=0$, поэтому руду необходимо подвергать измельчению непосредственно после радиационной обработки. В этом случае количество структурных дефектов в материале будет максимальным и возможно сокращение расхода электроэнергии в процессах дробления и измельчения, которые являются основными при рудоподготовке.

В [18] показано, что выбор оптимальной схемы рудоподготовки базируется на экспериментальном определении прямых прочностных показателей минерального сырья, косвенных показателей в сравнении с эталоном или нахождении удельных затрат электроэнергии, к которым сводятся все зарубежные методы.

Далее приводятся данные по оценке энергозатрат на разрушение и дробление на примере гранита с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний на разрушение при одноосном нагружении. Энергии разрушения и дробления (A) определялись по экспериментально полученным диаграммам “усилие – продольная деформация” (рис. 2).

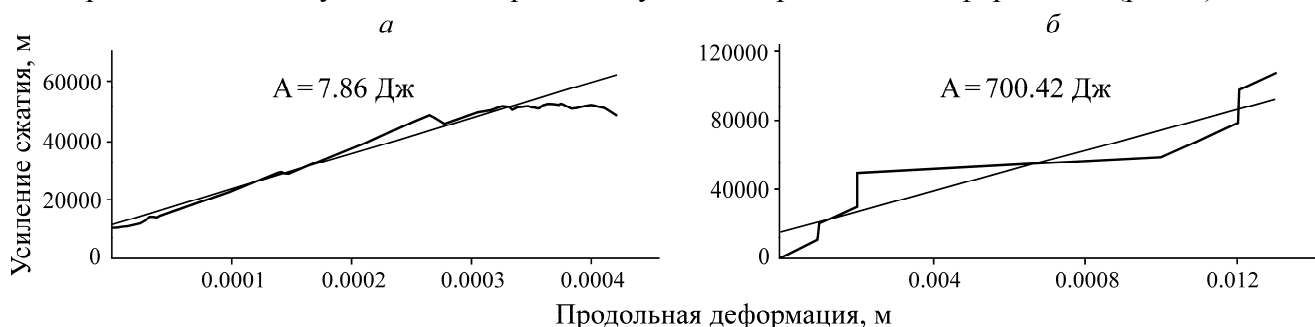


Рис. 2. Диаграммы “усилие – продольная деформация” для исходного образца гранита: *a* — при разрушении одноосным сжатием; *б* — при дроблении

Основные результаты исследований по влиянию обработки ускоренными электронами гранита на энергоемкость процессов его разрушения и дробления представлены в табл. 2 и 3.

ТАБЛИЦА 2. Энергии разрушения и дробления кернов гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Поглощенная доза, кГр	Энергия, Дж	
	разрушения	дробления
0	7.86	700.42
5	6.36	529.74
10	3.06	470.88
15	7.40	529.74
20	22.62	784.80

Как показывают результаты анализа данных табл. 2, энергии разрушения и дробления для гранита зависят от величины поглощенной образцами дозы. Предварительная обработка кернов гранита потоком ускоренных электронов при дозе 10 кГр позволяет снизить энергию разрушения одноосным сжатием с 7.68 до 3.06 Дж, а энергию дробления — сжатием с 700.42 до 470.88 Дж. Следует отметить, что при увеличении поглощенной дозы с 10 до 20 кГр энергии разрушения и дробления увеличиваются. Это подтверждает ранее сделанный вывод о возможном упрочнении гранита при дозе более 10 кГр. В табл. 3 представлен средний гранулометрический состав дробленых одноосным статическим сжатием разрушенных кернов гранита.

ТАБЛИЦА 3. Гранулометрический состав дробленого материала, полученного при одноосном статическом сжатии обработанных потоком ускоренных электронов кернов гранита после их разрушения

Поглощенная доза, кГр	Фракционный состав дробленого материала, %				
	< 2 мм	2 – 5 мм	5 – 7 мм	7 – 12 мм	> 12 мм
0	24.0	12.5	12.5	25.0	26.0
5	27.0	15.3	14.3	26.4	17.0
10	21.3	14.3	13.7	22.0	28.7
15	22.3	14.3	12.7	20.3	30.4
20	25.0	16.5	17.0	24.0	17.5

Использование ускоренных электронов для обработки кернов гранита позволяет не только снижать энергозатраты на их разрушение и дробление, но и изменять гранулометрический состав дробленого материала. Установленная на примере гранита возможность его разупрочнения при воздействии ускоренными электронами может быть использована для снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего породную основу в виде гранита и его составляющих — кварца и калиевого полевого шпата.

ВЫВОДЫ

Получены закономерности по влиянию поглощенной гранитом дозы при радиационной обработке на скорости распространения продольных и поперечных упругих волн. Изменения акустических свойств гранита связаны с его дефектностью, обусловленной памятью горной породы.

Наиболее существенные изменения скоростей распространения продольных и поперечных упругих волн в обработанных кернах гранита с течением времени наблюдаются при значении поглощенной дозы 10 кГр. 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.

Показано, что оценку энергозатрат на разрушение и дробление можно проводить с использованием оборудования для испытаний материалов на разрушение при одноосном нагружении. Предварительная радиационная обработка кернов гранита при дозе 10 кГр снижает энергию разрушения одноосным сжатием с 7.68 до 3.06 Дж, а энергию дробления — с 700.42 до 470.88 Дж. При увеличении поглощенной дозы с 10 до 20 кГр энергии разрушения и дробления увеличиваются, что подтверждает ранее сделанный вывод о возможном упрочнении гранита при дозе более 10 кГр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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: материалы Междунар. науч. конф., “Плаксинские чтения-2017” Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. — Красноярск: СФУ, 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 Междунар. совещ. “Плаксинские чтения-2012”, Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. — Петрозаводск: КНЦ РАН, 2012. — С. 3–10.
3. **Bochkarev G. R., Chanturiya V. A., Vigdergaus V. E., Lunin V. D., Viigelt Yu. P., Rostovtsev V. I., Voronin A. P., Auslender V. L., Polyakow V. A.** Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing, Proc. of the XX Int. Mineral Proc. Congr.: 21–26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, Vol. 1. — P. 231–243.
4. **Чантурия В. А., Бунин И. Ж.** Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. — 2007. — № 3. — С. 107–128.
5. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И., Коваленко К. А.** Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 187–202.
6. **Чантурия В. А., Трубецкой К. Н., Викторов С. Д., Бунин И. Ж.** Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. — М.: ИПКОН РАН, 2006. — 216 с.
7. **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: избр. тр. — М.: Наука, 1970. — С. 292–300.
8. **Ростовцев В. И., Кондратьев С. А., Бакшеева И. И.** Совершенствование обогащения медно-никелевых руд на основе энергетических воздействий // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 123–130.
9. **Ростовцев В. И.** О роли радиационной обработки минерального сырья в процессах рудоподготовки // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2018. — Т. 5. — № 1. — С. 207–213.
10. **Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бакшеева И. И.** Исследования прочностных свойств керновых образцов горных пород при их обработке пучком высокоэнергетических электронов // ФТПРПИ. — 2016. — № 4 — С. 168–176.
11. **Петрографический кодекс России.** — СПб.: ВСЕГЕИ, 2008. — 200 с.
12. **ГОСТ 28985–91.** Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
13. **ГОСТ 21153.2–84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

14. ГОСТ 21153.7–75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
15. Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 48–53.
16. Лавров А. В., Шкуратник В. Л., Филимонов Ю. Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. — М.: МГГУ, 2004. — 436 с.
17. Шемякин Е. И. Хрупкое разрушение горных пород // Горн. вестн. — 1998. — № 2. — С. 10–16.
18. Газалеева Г. И., Братыгин Е. В., Курков А. В., Рогожин А. А. К выбору критериев оптимальных схем рудоподготовки // Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья: материалы Междунар. конф. “Плаксинские чтения-2016”, Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2016 г. — Москва: Руда и Металлы, 2016. — С. 14–17.

Поступила в редакцию 28/II 2019

После доработки 28/II 2019

Принята к публикации 26/III 2019