

УДК 622.7

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ КЕРНОВЫХ ОБРАЗЦОВ
ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ ПУЧКОМ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ**

С. А. Кондратьев, В. И. Ростовцев, И. И. Бакшеева

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

Приведены результаты экспериментальных исследований механических свойств известняка, роговика и песчаника при обработке образцов кернов ускоренными электронами. Показано, что в результате обработки изменяются деформационно-прочностные характеристики исследованных горных пород. Установлено, что у известняка и роговика уменьшаются прочность при одноосном сжатии и модуль упругости, изменяется соотношение скоростей продольных и поперечных волн; у песчаника уменьшается прочность на растяжение, увеличиваются прочность при одноосном сжатии, скорости продольных и поперечных волн, а также динамический модуль Юнга. Модификация минерального сырья при обработке ускоренными электронами открывает перспективы для создания эффективных энергосберегающих технологий рудоподготовки и переработки комплексных руд сложного состава.

Минеральное сырье, известняк, роговик, песчаник, прочность, деформация, акустика, упругие волны, обработка ускоренными электронами, рудоподготовка

Развитие минерально-сырьевой базы на современном этапе 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.

Процесс предварительной подготовки рудного сырья, включающий его измельчение и вскрытие тонковкрапленных минеральных комплексов, имеет первостепенное значение для достижения максимально высокого извлечения металлов, в том числе и благородных, из упорного сырья. Как указывается в [1], дезинтеграция минерального сырья является основной технологической операцией в процессе рудоподготовки. Анализ энергозатрат показывает, что они сравнительно низкие на стадиях дробления (до 1.2 кВт·ч/т) и высокие на стадиях измельчения (50 кВт·ч/т и выше).

Для минимизации потерь полезных компонентов при обогащении минерального сырья используется механическое измельчение до необходимой крупности с достижением эффекта раскрытия тонких минеральных сростаний. С целью сокращения расхода электроэнергии при рудоподготовке труднообогатимых руд перспективно использование энергетических воздействий, позволяющих преодолеть их физическую упорность и достичь селективной дезинтеграции без излишнего переизмельчения [2 – 5].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-10017).

Идея воздействия ионизирующим облучением на минералы зародилась в конце прошлого века [6]. Результаты экспериментов продемонстрировали, что разнообразные источники излучения (быстрые нейтроны, гамма-, бета- и рентгеновские лучи) улучшают флотационные свойства минералов, например рутила, кварца, полевого шпата, шеелита и др. [3, 6–9]. Модификация минералов и руд под действием ускоренных электронов планомерно апробируется рядом ученых [10–11]. В настоящее время установлено, что свойства минерального сырья, включая поверхностные, объемные, магнитные, электрические и механические, изменяются под влиянием электронного облучения.

Основываясь на различных механизмах воздействия радиации на минералы, сделаны предположения, объясняющие изменения их механических свойств [12]. Первое базировалось на законе Кулона и возникающих отталкивающих сил и напряжений, обусловленных ими [13, 14]. Во время облучения руда приобретает определенный электрический заряд, который со временем рассеивается. В диэлектриках он распределяется по объему [15]. В [13] разработана методика для расчета распределения напряжений внутри минерала, представленного в виде однородного наэлектризованного шара. Установлено, что при наличии в минерале дефектов будет происходить расширение трещины и уменьшение прочности материала частицы.

В [12, 16] приведена другая гипотеза разупрочнения минералов, связанная с тепловым пробоем частицы за счет термического действия ускоренных электронов. Численным моделированием с помощью нестационарного уравнения теплопроводности и модели упругой деформации на примере гранита, кварца и магнетита установлено, что в них создаются чередующиеся температурные напряжения, достигающие предела прочности минералов. Результаты экспериментов с кварцем при высокой температуре подтверждают эту гипотезу.

Цель настоящих исследований — комплексное изучение прочностных свойств керновых образцов известняка, песчаника и роговика, обработанных пучком высокоэнергетических электронов.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на примере керновых образцов известняка, роговика и песчаника. Известняк — одна из самых широко распространенных осадочных горных пород. Залежи известняков составляют 19–22 % от всей массы осадочных пород. Известняк — натуральный природный камень, состоящий в основном из карбоната кальция (кальцита CaCO_3), который является третьим по распространенности в земной коре минералом после кварца и полевого шпата. Большое количество кальцита откладывается из горячих вод в гидротермальных жилах с сульфидами, а также в миндалинах эффузивных пород вместе с цеолитами, халцедоном, кварцем, баритом.

К песчаникам приурочены месторождения различных полезных ископаемых. Благодаря своей высокой пористости и проницаемости, они являются хорошими коллекторами для газа, нефти или воды. С медистыми песчаниками связаны крупнейшие медные месторождения, такие как Джезказган, Удокан и др.

В роговиках встречаются месторождения медь-молибденовой формации, содержащей медь, молибден, золото, серебро, свинец, цинк, кобальт, висмут и ртуть (Эндыбайское, Якутия); сурьмы (Терекское, Киргизия; Сингуашань, Китай); вольфрама (Тигриное, Приморье) и других металлов и минералов.

Определение физико-механических свойств известняка, песчаника и роговика осуществлялось на образцах керна в виде цилиндров правильной формы в соответствии с действующими стандартами и методиками на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку: диаметр d образцов составлял 29.5 мм, высота h — 60.2 мм, коэффициент формы h/d — 2.04, что соответствует требованиям ГОСТ 21153.2-84. Испытания на растяжение (бразильская проба) проводились на специальных образцах песчаника и роговика меньшего размера.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования механических свойств известняка и роговика осуществлялись с помощью комплекса оборудования ИГД СО РАН для испытаний на разрушение при одноосном нагружении с определением акустических характеристик керновых образцов. В состав комплекса входили следующие установки и оборудование:

— гидравлическая установка ИГД СО РАН с предельной осевой нагрузкой 1000 кН с измерительной камерой, обеспечивающая следующие режимы нагружения — осевое сжатие, трехосное сжатие, растяжение и автоматическую запись в память компьютера результатов эксперимента;

— разработанный и изготовленный в ИГД СО РАН комплект оборудования с использованием сертифицированных датчиков S1802-0.05A0D4PU производства фирмы “Акустические Контрольные Системы, г. Москва” для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн;

— стенд для определения деформационных и акустических характеристик при одноосном и трехосном нагружении образцов керна, позволяющий в процессе экспериментов проводить непрерывное измерение прямым методом деформации и осуществлять запись осевой нагрузки, продольной и поперечных деформаций между торцами образца и в средней его части. Для этого в состав стенда входил преобразователь линейных перемещений ЛИП-940-PCI-9pin-GO фирмы ОАО “СКБ ИС”.

Испытания образцов песчаника выполнялись на сервогидравлическом прессе INSTRON 8802, программа нагружения задавалась по перемещению траверсы прессы со скоростью нагружения 0.5 мм/мин. В процессе экспериментов проводилось непрерывное измерение и запись в компьютерный файл осевой нагрузки, продольных (изменение длины) и поперечных (изменение диаметра) деформаций образца. При испытаниях на растяжение (бразильская проба) осуществлялась запись осевой нагрузки. Пресс и комплект датчиков фирмы INSTRON соответствуют требованиям международных стандартов, позволяют получать прочностные и деформационные характеристики на всех стадиях нагружения образцов вплоть до их разрушения. Определение деформационных свойств горных пород проводилось согласно требованиям [17–21].

Подготовленные керны образцов известняка, роговика и песчаника обрабатывались 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. Ток пучка импульсный 320 мА, ширина развертки пучка 90 см, частота повторения импульсов 2.5 Гц, скорость транспортировки кернов 2 см/с, расстояние от выпускного окна до образца 33 см.

Общий вид отдельных комплектов оборудования для экспериментального исследования механических свойств керновых образцов показан на рис. 1.

Проведены испытания образцов керна на одноосное сжатие и растяжение, определены скорости упругих продольных и поперечных волн в атмосферных условиях, а также акустические свойства образцов керна в атмосферных условиях в зависимости от осевого напряжения сжатия. С целью определения модуля деформации и коэффициента Пуассона велась непрерывная запись временных диаграмм продольной нагрузки, продольного перемещения и изменения диаметра.

Предел прочности при одноосном сжатии σ^e для каждого из исследованных образцов керна, относительные осевая ε_z и окружная ε_φ деформации рассчитывались по формулам:

$$\sigma^e = \frac{P_c}{S} \quad \varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{\Delta d}{d},$$

где P_c — разрушающая нагрузка, кН; S — площадь поперечного сечения образца, см²; Δl — абсолютное продольное перемещение, м; l — длина образца, м; Δd — абсолютное изменение диаметра, м; d — диаметр образца, м.

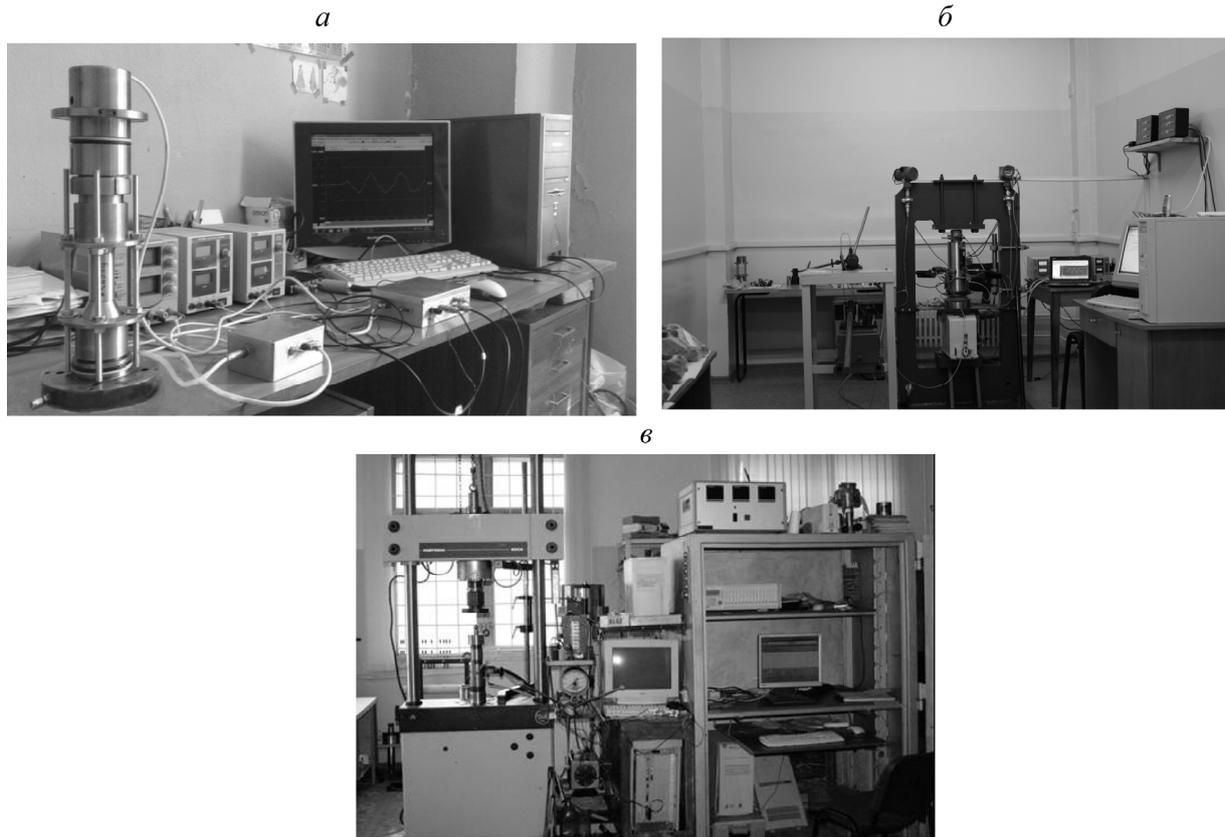


Рис. 1. Общий вид: *а* — прибора для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн в образцах известняка и роговика; *б* — стенда для определения деформационных и акустических характеристик при одноосном и трехосном нагружении образцов керна известняка и роговика; *в* — комплекса для испытаний образцов керна песчаника на базе сервогидравлического пресса INSTRON 8802 (ЦКП ИГД СО РАН)

Модуль деформаций E_d и коэффициент поперечной деформации ν определялись в выбранном диапазоне напряжений $\sigma_2 - \sigma_1$ прямолинейного участка нагрузочной ветви с учетом формул:

$$E_d = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2^z - \varepsilon_1^z}, \quad \nu = \frac{\varepsilon_2^\phi - \varepsilon_1^\phi}{\varepsilon_2^z - \varepsilon_1^z},$$

где σ_1, σ_2 — напряжения в начале и в конце диапазона при нагружении, МПа; $\varepsilon_1^z, \varepsilon_2^z$ — относительные продольные деформации образца в начале и в конце диапазона при нагружении; $\varepsilon_1^\phi, \varepsilon_2^\phi$ — относительные поперечные деформации образца в начале и в конце диапазона при нагружении.

Скорости распространения продольных $V_{пр}$ и поперечных волн $V_{п}$ в исследованных образцах керна известняка, роговика и песчаника вычисляли с использованием формул:

$$V_{пр} = \frac{l}{t_{пр} - t_{пр.з}}, \quad V_{п} = \frac{l}{t_{п} - t_{п.з}},$$

где l — длина образца керна, м; $t_{пр}, t_{п}$ — время пробега упругого импульса продольной волны и сдвигового импульса (поперечной волны) от излучателя до приемника, с; $t_{пр.з}, t_{п.з}$ — время задержки импульса в приборе и преобразователях для продольной и поперечной волн соответственно, с.

Динамические модуль упругости $E_{\text{дин}}$, коэффициент Пуассона $\nu_{\text{дин}}$ и плотность материала кернов ρ определяли по формулам:

$$E_{\text{дин}} = \frac{V_{\text{п}}^2 \rho (3V_{\text{пр}}^2 - 4V_{\text{п}}^2)}{V_{\text{пр}}^2 - V_{\text{п}}^2}, \quad \nu_{\text{дин}} = \frac{V_{\text{пр}}^2 - 2V_{\text{п}}^2}{2(V_{\text{пр}}^2 - V_{\text{п}}^2)}, \quad \rho = \frac{m}{0.785d^2l},$$

где m — масса образца керна.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные результаты исследования по изучению влияния обработки ускоренными электронами кернов известняка, песчаника и роговика на их механические и акустические свойства приведены в табл. 1 – 3 и на рис. 2.

ТАБЛИЦА 1. Результаты механического и динамического тестирования кернов известняка, роговика и песчаника, обработанных потоком ускоренных электронов

Номер образца	Поглощенная доза, кГр	Размер образца, $d \times l$, мм	Механические свойства		
			Предел прочности σ^e , МПа	Упругие статические характеристики	
				Одноосное сжатие	Модуль деформации E , ГПа
Известняк ($\rho = 2.68 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.2	49.11	13.20	0.17
5	5	29.5×60.5	76.61	13.32	0.22
10	10	29.5×60.5	38.24	7.44	0.26
15	15	29.5×60.4	35.24	10.43	0.38
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.3	123.15	29.70	0.175
5	5	29.4×60.3	115.20	22.72	0.18
10	10	29.4×60.3	78.97	9.71	0.18
15	15	29.5×60.2	135.89	28.64	0.19
Песчаник ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.3	141.8	47.04	0.194
5	5	29.4×60.3	148.1	54.99	0.192
10	10	29.4×60.3	143.0	60.51	0.184
15	15	29.5×60.2	148.3	75.32	0.180

Анализ данных табл. 1 показывает, что обработка потоком ускоренных электронов кернов известняка, роговика и песчаника изменяет их механические свойства. Увеличение поглощенной дозы приводит к снижению: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр — 35.24 МПа. Значения коэффициентов Пуассона при увеличении поглощенной дозы возрастают. Без обработки его значение составляет 0.17, а при поглощенной дозе 15 кГр — 0.38. Аналогичная закономерность наблюдается и для роговика.

Для песчаника отмечают незначительное повышение предела прочности на сжатие, увеличение модуля деформации и некоторое снижение коэффициента Пуассона. Без обработки предел прочности на сжатие для песчаника составляет 141.8 МПа, при поглощенной дозе 15 кГр — 148.3 МПа. Значения коэффициентов Пуассона для исследованных образцов песчаника при увеличении поглощенной дозы незначительно уменьшаются. Так, без обработки его значение составляет 0.194, а при поглощенной дозе 15 кГр — 0.180.

Данные табл. 2 показывают, что в результате воздействия ускоренными электронами изменяются и акустические свойства известняка, роговика и песчаника. Для известняка и роговика с увеличением поглощенной дозы уменьшаются скорости продольных и поперечных волн. Для исходного образца зерна известняка скорости продольных и поперечных волн равны 5021 и 2657 м/с соответственно, а для обработанного при дозе 15 кГр образца — 4485 и 1982 м/с. Отношение продольной и поперечной скоростей в атмосферных условиях в среднем составляет 2.14. Для обработанных потоком ускоренных электронов образцов известняка это отношение равно 2.2–2.3, против 1.89 для необработанного ядерного образца известняка. Для роговика также наблюдается уменьшение продольных и поперечных скоростей при увеличении дозы. Особенностью песчаника является незначительное увеличение скорости продольных и поперечных волн с увеличением поглощенной дозы, что, вероятно, связано с высокими пористостью и проницаемостью исходных образцов, а также сложным минеральным составом песчаника [22, 23].

ТАБЛИЦА 2. Результаты определения акустических свойств образцов ядерных известняка, роговика и песчаника, обработанных потоком ускоренных электронов

Номер образца	Поглощенная доза, кГр	Размер образца, $d \times l$, мм	Атмосферные условия			
			Скорость волн, м/с		Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
			продольных	поперечных		
Известняк ($\rho = 2.68 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.2	5021	2657	49.30	0.31
5	5	29.5×60.5	4605	1992	29.50	0.38
10	10	29.5×60.5	4386	1992	29.21	0.37
15	15	29.5×60.4	4485	1982	28.62	0.38
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.3	5601.3	3030.7	63.62	0.287
5	5	29.4×60.3	5339.7	2972.7	60.62	0.277
10	10	29.4×60.3	5345.7	3012.0	61.81	0.267
15	15	29.5×60.2	5233.3	2971.3	59.52	0.260
Песчаник ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.2	4082	2514	37.04	0.291
5	5	29.5×60.5	4181	2581	39.01	0.288
10	10	29.5×60.5	4154	2591	38.89	0.276
15	15	29.5×60.4	4087	2554	37.78	0.270

В соответствии с табл. 2 определены скорости продольных волн для исходных образцов горных пород: для известняка 5021 м/с; для роговика 5601.3 и для песчаника 4082 м/с. Учитывая, что пористость для известняка находится в пределах 0.65–33 % (для известнякового щебня 5.4–7.3 %), для песчаника — 3.5–29.0 %, для роговика — до 3.5 %, по возрастанию скорости продольных волн исследованные горные породы располагаются в следующей последовательности: роговик–известняк–песчаник. Эти данные подтверждают установленную в ряде работ, например в [23], зависимость, которая показывает, что скорость продольных волн уменьшается с увеличением пористости. Наблюдаемая закономерность снижения скорости продольных волн при увеличении поглощенной дозы для известняка и роговика может быть связана с образованием новых пор.

В табл. 3 показано влияние обработки ускоренными электронами образцов роговика и песчаника на их прочностные характеристики при растяжении. Установлено, что при увеличении поглощенной дозы предел прочности на растяжение уменьшается. Без обработки он составляет: для роговика — 26.76 МПа, а после обработки при дозе 15 кГр — 22.85 МПа; для песчаника соответственно — 18.50 и 16.90 МПа.

Таким образом, как следует из табл. 1–3, изменение основных деформационно-прочностных характеристик известняка, роговика и песчаника связано с модификацией их структуры под действием обработки потоком ускоренных электронов. Этот вывод следует из анализа образцов кернов известняка и песчаника после разрушения (рис. 2). В результате разрушения образцов кернов известняка и песчаника, обработанных потоком ускоренных электронов одноосным сжатием, образуется большее количество частиц по сравнению с исходными образцами (рис. 2*а, б*). Если из исходного образца известняка образуется только две частицы, то из обработанного ускоренными электронами — 5–7 частиц (рис. 2*а*). Для песчаника эффект увеличения частиц при разрушении обработанных кернов одноосным сжатием (рис. 2*б*) и при растяжении (рис. 2*в*) не столь заметен.

ТАБЛИЦА 3. Влияние обработки ускоренными электронами образцов роговика и песчаника на их прочностные характеристики при растяжении

Номер образца	Поглощенная доза, кГр	Размер образца, $d \times l$, мм	Предел прочности на растяжение σ^e , МПа
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)			
0	0	29.6×31.0	26.76
5	5	29.5×30.8	23.62
10	10	29.5×30.8	25.27
15	15	29.5×30.9	22.85
Песчаник ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)			
0	0	29.5×30.9	18.50
5	5	29.5×30.8	11.90
10	10	29.5×30.8	13.40
15	15	29.6×31.0	16.90

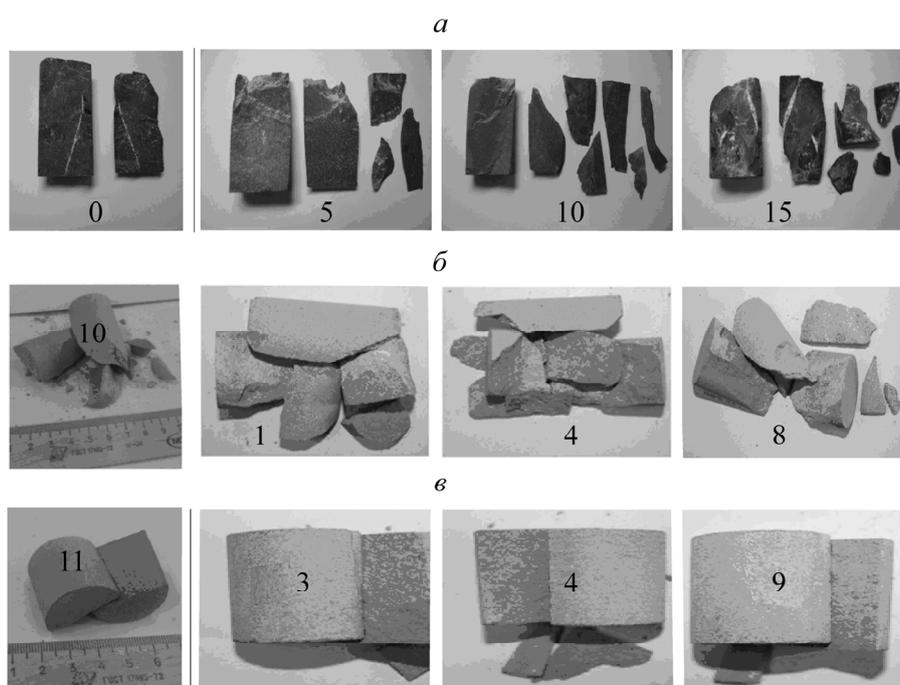


Рис. 2. Фотографии образцов: *а* — керны известняка после разрушения одноосным сжатием; *б* — керны песчаника после разрушения одноосным сжатием; *в* — керны песчаника после разрушения растяжением; 0, 10, 11 — исходные образцы; 5, 10 и 15; 1, 4, 8; 3, 4, 9 — образцы керна, обработанные потоком ускоренных электронов при дозах 5, 10 и 15 кГр

Установленные для известняка, роговика и песчаника закономерности при их разрушении после воздействия потоком ускоренных электронов связаны со спецификой взаимодействия электронов с твердым веществом [9, 24]. Пучок электронов порождает точечные дефекты в минералах за короткий промежуток времени $\sim 10^{-11}$ с, в течение которого появляются вакансии и равное им число дислоцированных атомов. Равновесие между ними достигается образованием постоянных кластеров или исчезновением неустойчивых повреждений диффузионным переносом. При обработке пучком электронов вносится определенный заряд, что приводит к зарядке поверхности и появлению потенциала. Во время облучения под действием электрического поля дефекты непрерывно мигрируют, объединяются и движутся в поле между дислокациями и границами раздела. Затем, достигая предельной концентрации, вакансии объединяются в каверны. Последние являются дефектами, которые становятся местами нарушения целостности материала. Этот факт подтверждает падение скорости волн в образцах известняка и роговика после обработки ускоренными электронами.

Кроме того, за счет воздействия ускоренных электронов в диэлектриках накапливается местный заряд с образованием электрического поля [3, 15]. Как следствие этого облегчаются перемещения дислокаций в минералах и интенсифицируются процессы их разрушения.

Таким образом, механические свойства минерального сырья изменяются под действием обработки потоком ускоренных электронов. Каверны, электрический пробой и скопление дислокаций по границам минералов приводят к появлению микротрещин и потере механической прочности.

ВЫВОДЫ

Выполненные комплексные экспериментальные исследования прочностных свойств керновых образцов известняка, роговика и песчаника при их обработке пучком высокоэнергетических электронов показали, что при увеличении поглощенной дозы снижаются предел прочности на сжатие, модули деформации и упругости, а значения коэффициента Пуассона увеличиваются. Для песчаника наблюдается незначительное повышение предела прочности на сжатие, увеличение модуля упругости и снижение коэффициента Пуассона.

С ростом поглощенной дозы уменьшаются скорости продольных и поперечных волн для известняка и роговика, а для песчаника наблюдается их незначительное увеличение (на 1.5–2.5 %). Соотношение продольной и поперечной скоростей в атмосферных условиях в среднем составляет 2.14. Наблюдаемая закономерность снижения скорости продольных волн при увеличении поглощенной дозы для известняка и роговика может быть связана с образованием новых дефектов и трещин, повышающих пористость и снижающих скорость продольных волн.

Исследования воздействия ускоренных электронов на роговик и песчаник показали, что при увеличении дозы прочность роговика при одноосном сжатии уменьшается, а прочность песчаника несколько увеличивается, при растяжении — уменьшается.

Теоретический анализ возможного действия потока ускоренных электронов на известняк, роговик и песчаник показал, что накопление дефектов облучения и развитие нарушений сплошности среды на многофазной границе раздела составляющих горную породу компонентов, а также индуцированный излучением электрический пробой приводят к нарушениям структуры в горных породах, потере их механической прочности, что может быть использовано для снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке и минимизации потерь полезных компонентов при обогащении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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”, 10–14 сентября 2012 г. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. — С. 3 – 10.

2. **Чантурия В. А., Бунин И. Ж.** Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов // ФТПРПИ. — 2007. — № 3. — С. 107 – 128.
3. **Bochkarev G. R. et al.** Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing, Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21 – 26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol. 1. — P. 231 – 243.
4. **Ростовцев В. И.** О технологической и экономической эффективности использования немеханических энергетических воздействий при переработке труднообогатимого минерального сырья // ФТПРПИ. — 2013. — № 4. — С. 145 – 155.
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., Шафеев Р. Ш., Якушкин В. П.** Влияние ионизирующих излучений на процесс флотации. — М.: Наука, 1971. — 61 с.
7. **Богидаев С. А., Малов В. В., Афанасьева Р. В.** Адсорбция ксантогената на гамма-облученных минералах свинца и цинка // ФТПРПИ. — 1990. — № 3. — С. 115 – 117.
8. **Чантурия В. А., Иванова Т. И., Лунин В. Д. и др.** Влияние жидкой фазы и продуктов ее радиолитизации на поверхностные свойства пирита и арсенопирита // ФТПРПИ. — 1999. — № 1. — С. 85 – 91.
9. **Хуайфа В., Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Вейгельт Ю. П., Шоуци Лу.** Интенсификация обогащения полиметаллических сульфидных руд высокоэнергетическими электронами // ФТПРПИ. — 2002. — № 5. — С. 96 – 103.
10. **Huaifa Wang, Shouci Lu.** Modifyng effect of electron beam Irradiation on magnetic property of iron-bearing minerals, Journal Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2014, No. 50(1). — P. 79 – 86.
11. **Korobeinikov M. V., Bryazgin A. A., Bezuglov V. V., et al.** Radiation-thermal treatment in ore dressing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 81 (2015) 012124. — P. 1 – 6.
12. **Бочкарев Г. Р., Вейгельт Ю. П., Изотов А. С. и др.** Радиационные термонапряжения в минералах и их роль в процессах обогащения магнетитовых кварцитов // ФТПРПИ. — 2001. — № 3. — С. 104 – 111.
13. **Бочкарев Г. Р., Вейгельт Ю. П., Михайлов А. М. и др.** О причинах уменьшения прочности минералов при их электронной обработке // ФТПРПИ. — 1996. — № 3. — С. 116 – 120.
14. **Михайлов А. М., Ростовцев В. И.** О механизме разупрочнения и разрушения минерального сырья электронным пучком // ФТПРПИ. — 1998. — № 2. — С. 98 – 103.
15. **Ковалев А. Т.** Возможность использования радиационной электризации для электрического разделения измельченной минеральной смеси // ФТПРПИ. — 1999. — № 2. — С. 100 – 104.
16. **Бочкарев Г. Р., Вейгельт Ю. П., Михайлов А. М. и др.** Роль теплового фактора при обработке минерального сырья высокоэнергетическими электронами и возможность его использования для интенсификации процессов обогащения // ФТПРПИ. — 1996. — № 5. — С. 90 – 96.
17. **ГОСТ 28985-91.** Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
18. **ГОСТ 21153.2-84.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
19. **ГОСТ 21153.3-85.** Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении.
20. **ГОСТ 21153.7-75.** Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
21. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1979. — 712 с.
22. **Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г.** Экспериментальная физика и механика горных пород. — СПб.: Наука, 2001. — 343 с.
23. **Ерофеев Л. Я., Вахромеев Г. С., Зинченко В. С., Номоконова Г. Г.** Физика горных пород. — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 520 с.
24. **Ромбах В. П.** Введение в физику разрушения. — Эдмондс, штат Вашингтон, США. — 2014. — 320 с.

Поступила в редакцию 27/V 2016