

УДК 622.611.4:620.179.16

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНО-АКУСТИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

В. Н. Иньков, Е. Б. Черепецкая, В. Л. Шкуратник
А. А. Карабутов*, В. А. Макаров*

Московский государственный горный университет, 119991 Москва

* Международный лазерный центр МГУ им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва

E-mails: ftkp@mail.ru, aak@sasha.phys.msu.su

Методами лазерной ультразвуковой спектроскопии исследованы закономерности влияния обусловленной микротрещиноватостью нелинейности горных пород на форму распространяющихся в них упругих импульсов.

Ключевые слова: лазерная ультразвуковая диагностика, микротрещиноватость геоматериалов, структурные неоднородности.

Введение. Микротрещиноватость — одна из важнейших характеристик геоматериалов, во многом определяющая их кубиковую прочность, морозостойкость, истираемость, упругие и другие свойства, в том числе технологические, влияющие на эффективность процессов разрушения и обогащения [1]. Кроме того, микротрещиноватость играет важную роль в подготовке макроразрушения горных пород, а также опасных динамических явлений в них [2] и, следовательно, должна учитываться при решении задач прогноза и контроля этих процессов. В настоящее время оценка микротрещиноватости чаще всего проводится методом микроструктурного анализа шлифов, который позволяет получать параметры трещин путем их прямой визуализации под микроскопом. Однако объективная оценка микротрещиноватости горных пород по образцам предполагает использование статистического подхода, связанного с осреднением данных, полученных при исследовании большой серии шлифов, подготовка которых чрезвычайно трудоемка.

Значительно реже применяется метод капиллярной пропитки образцов люминесцирующей под действием ультрафиолетового излучения жидкостью с последующим их микроскопическим анализом [3]. Этот метод обеспечивает получение искомой информации только с поверхности исследуемых объектов и не позволяет контролировать распределение микротрещин по их глубине.

С учетом отмеченных выше проблем эффективным инструментом для изучения интегральной микротрещиноватости являются ультразвуковые методы проходящих волн, использующие в качестве информативного параметра скорость распространения упругих колебаний [4]. Однако эта скорость изменяется под влиянием микротрещиноватости сравнительно мало (до нескольких процентов). Более того, она существенно зависит от ряда факторов (размеров минеральных зерен, их ориентации, разного рода включений,

контактных условий и др.), которые не позволяют однозначно выделить вклад микротрещиноватости в изменение скорости.

В связи с этим в последнее время интенсивно развиваются относительно более помехоустойчивые методы дефектоскопии геоматериалов, основанные на нелинейных эффектах при распространении мощных ультразвуковых сигналов в трещиноватых средах. К таким эффектам относятся генерация высших гармоник, возникновение комбинационных частот, нелинейное затухание ультразвука, сдвиг резонансных частот и т. д. [5–10].

Как показывают теоретические исследования последних лет [11–13], нелинейность может иметь и другие проявления, использование которых позволяет повысить чувствительность оценки микротрещиноватости. В рамках гистерезисных моделей показано, что нелинейность существенно изменяет форму импульсов упругих волн. Однако экспериментальные работы, в которых наблюдалось бы нелинейное искажение временных профилей, отсутствуют. Это связано в первую очередь с тем, что до недавнего времени не существовало технических возможностей возбуждения мощных широкополосных упругих импульсов в геосреде. В настоящей работе методами лазерной ультразвуковой структуроскопии впервые экспериментально исследуется влияние трещиноватости образцов горных пород на нелинейное искажение формы сигналов.

Теоретические модели. Теоретические исследования процессов нелинейного распространения и взаимодействия акустических волн в различных твердотельных средах проводились, как правило, в рамках классической пяти- или девятиконстантной теории упругости [14]. При этом для продольных напряжений σ и деформаций ε в качестве уравнения состояния рассматривается разложение в ряд Тейлора $\sigma(\varepsilon)$ соответственно в квадратичном или кубичном приближениях. При распространении гармонического сигнала в такой среде наблюдается генерация высших гармоник, а при распространении импульсного сигнала происходит формирование ударного фронта.

Для описания неоднородных сред, к которым относятся горные породы, такой подход неприменим. Их сложная структура и наличие трещин, зерен, пор и т. д. вызывают необходимость использования более сложного уравнения состояния.

К настоящему времени как в акустике, так и в сейсмоакустике [7] для описания нелинейных волновых процессов в различных микронеоднородных средах все чаще применяют уравнения состояния, содержащие гистерезисную нелинейность. В работах [5–9] на основе анализа экспериментально установленных амплитудных зависимостей нелинейных потерь, сдвига резонансных частот и уровней высших гармоник в резонаторах из металлов и горных пород (гранита и мрамора) были предложены гистерезисные уравнения состояния с квадратичной и кубичной нелинейностью. В рамках этих уравнений методом возмущений исследовались нелинейные волновые процессы в безграничной среде и стержневом резонаторе. Из сравнения аналитических расчетов с результатами проведенных экспериментов были определены значения параметров гистерезисной нелинейности этих сред.

В цикле теоретических и экспериментальных работ, основные результаты которых изложены в обзоре [10], гистерезисные зависимости были получены в результате численного моделирования поведения среды, содержащей ансамбль элементов Преисаха — Майергойца [15]. В рамках полученного таким образом гистерезиса проводилось исследование нелинейного искажения первоначально гармонической волны. В результате были определены значения эффективных параметров нелинейности для песчаника, известняка и бетона. В работах [11–13] предложено аналитическое (в квадратичном приближении) описание такого гистерезиса и проведено теоретическое исследование распространения и взаимодействия первоначально гармонических волн и треугольных импульсов.

В рамках данных моделей трансформация несимметричного треугольного биполярного импульса (рис. 1, кривая 1) происходит следующим образом [13]. С расстоянием,

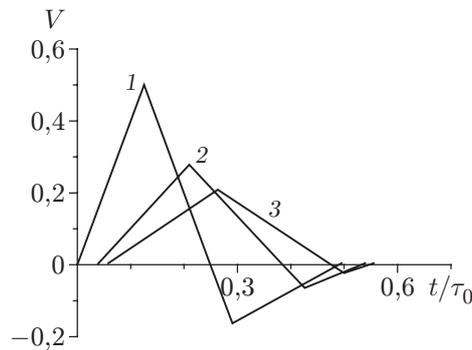


Рис. 1. Искажения треугольного импульса для различных значений нелинейного параметра ζ :

1 — сигнал на входе ($\zeta = 0$); 2 — $\zeta = 0,5$; 3 — $\zeta = 5/3$

которое импульс проходит в гистерезисной среде, увеличивается длительность каждой из фаз и меняется соотношение между их амплитудами (см. рис. 1, кривые 2, 3). Фаза разрежения на определенных расстояниях полностью поглощается. Нелинейные искажения несимметричных биполярных импульсов представлены на рис. 1 для различных значений параметра $\zeta = x/x_{nl}$, где x — расстояние, пройденное волной в среде; $x_{nl} = 2c_0^2\tau_0/(hV_0)$ — нелинейный параметр; c_0 — скорость распространения продольных волн; τ_0 — начальная длительность импульса; V_0 — амплитуда колебательной скорости частиц; h — ширина гистерезисной петли.

Для сильнотрещиноватых сред трансформация биполярного импульса происходит иначе: скорости распространения фазы сжатия и фазы разрежения биполярного импульса различны, в силу чего происходит их разделение во времени.

Экспериментальные исследования. Исследовались кубические образцы карельского габбро с длиной ребра около 3 см. Предел прочности их на одноосное сжатие составлял приблизительно 300 МПа. Изучались две группы образцов. Первую группу составляли образцы с продольными трещинами. Предварительная локализация их осуществлялась с помощью лазерной ультразвуковой эхоскопии [16]. При этом проводилось сканирование по поверхности образца и с помощью компьютерной обработки сигналов строилось изображение плоскости сечения, в которой располагалась трещина. Во вторую группу были отобраны образцы, не содержащие трещин и, как показали измеренные частотные зависимости скорости распространения продольных упругих волн и коэффициента их затухания в диапазоне частот 1–3,5 МГц, изотропные.

Для исследования нелинейной трансформации акустических импульсов, прошедших через образцы горных пород обеих групп, использовалась установка «ГЕОСКАН-02М», описанная в работе [17]. Источник оптических импульсов в данной установке — твердотельный лазер, работающий на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм. Длительность лазерного импульса $\tau_0 = 10$ нс, а максимальное значение энергии 260 мДж. С помощью светофильтров энергию можно было уменьшать до 20 мДж. Радиус пучка составлял 5 мм. В результате поглощения лазерного импульса в генераторе (он представлял собой пленку полиэтилена высокого давления) возбуждались импульсы упругих продольных волн длительностью 100 нс и амплитудой давления до 10 МПа. Для измерения параметров акустических сигналов, прошедших через образец, использовался иммерсионный метод: исследуемые образцы помещались в дистиллированную воду. Сигналы, прошедшие через образец, регистрировались широкополосным пленочным пьезоприемником. Последний через предусилитель был соединен с цифровым запоминающим осциллографом Textronix TDS-220 (аналоговая ча-

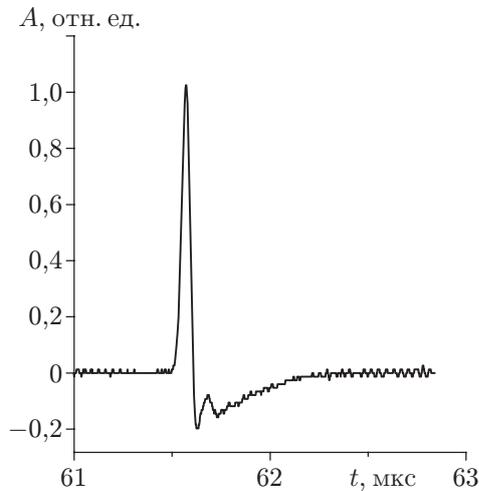


Рис. 2

Рис. 2. Форма опорного акустического импульса, прошедшего через кювету с дистиллированной водой

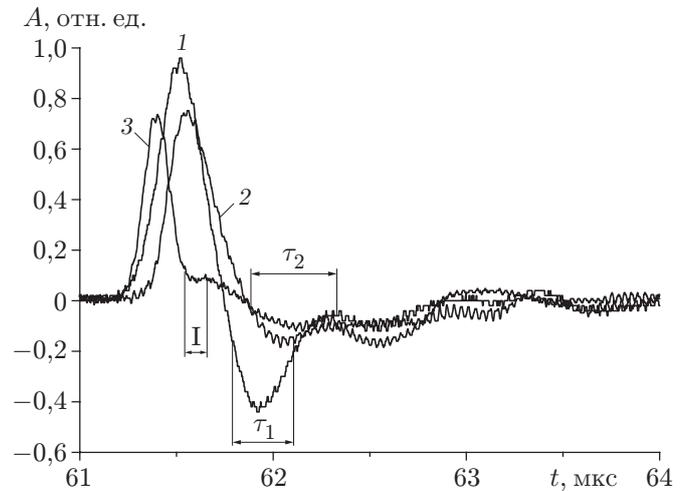


Рис. 3

Рис. 3. Формы акустических сигналов, прошедших через образец карельского габбро:

1 — через область без трещины; 2 — вблизи трещины; 3 — через трещину

стота 100 МГц, частота дискретизации 1 ГГц), сигнал с которого поступал на компьютер. Временное разрешение системы регистрации составляло 3–4 нс, отношение сигнал/шум — 30 дБ.

С использованием описанной аппаратуры проводилось ультразвуковое облучение различных областей образцов первой группы. Результаты исследований приведены для одного из наиболее типичных образцов. Первоначально изучались области, в которых трещин нет.

На рис. 2 представлен опорный импульс, прошедший через кювету с дистиллированной водой. В этом импульсе наблюдаются фазы сжатия и разрежения с соотношением амплитуд 5 : 1. Причем спектр такого сигнала простирается вплоть до 10 МГц. При прохождении данного импульса через область без трещин дифракция и рассеяние на неоднородностях образца приводят к уменьшению амплитуды фазы сжатия и к заметному увеличению амплитуды фазы разрежения по отношению к фазе сжатия (кривая 1 на рис. 3; соотношение амплитуд данных фаз становится равным 2,5 : 1). Кроме того, длительность импульса увеличивается в 3 раза в связи с рассеянием высокочастотной части спектра, в котором остаются частоты не выше 3 МГц. Поскольку локализация трещины была известна, вторая область прозвучивания выбиралась таким образом, что ультразвуковым пучком частично захватывалось начало трещины. В этом случае происходила нелинейная трансформация формы импульса (кривая 2 на рис. 3). Эта трансформация проявлялась в первую очередь в резком уменьшении амплитуды фазы разрежения (в 2,7 раза) при увеличении ее длительности τ от первоначального значения $\tau_1 = 0,348$ мкс в сигнале, прошедшем через область без трещины, до значения $\tau_2 = 0,446$ мкс. При этом амплитуда фазы сжатия уменьшалась всего лишь в 1,5 раза, а ее длительность практически не изменялась по сравнению с сигналом, прошедшим через цельную часть образца. При прохождении опорного сигнала непосредственно через середину трещины на фоне резкого уменьшения амплитуды фазы разрежения наблюдалось разделение во времени двух фаз биполярного импульса (кривая 3 на рис. 3). Наличие горизонтального участка I в акустическом сигнале

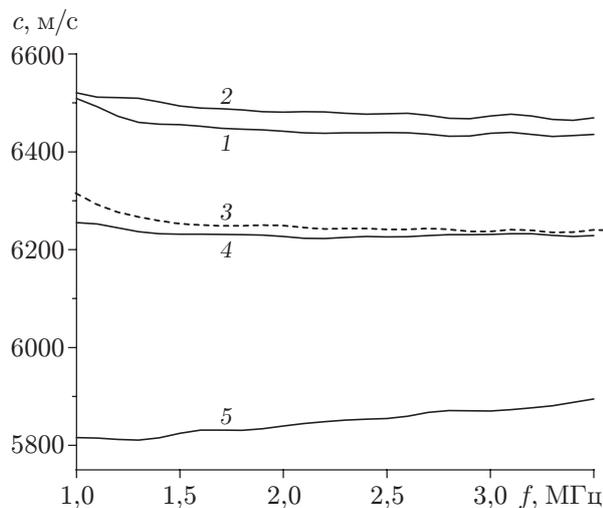


Рис. 4

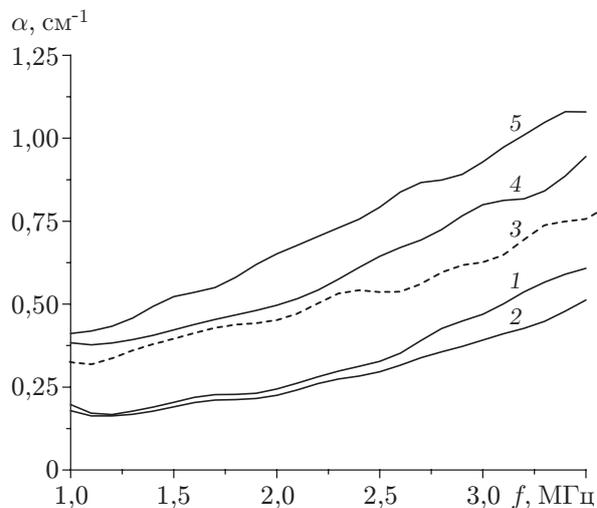


Рис. 5

Рис. 4. Зависимость от частоты скорости распространения продольных волн в направлении нагружения образца карельского габбро, испытанных нагрузки σ , МПа:

1 — 34; 2 — 68; 3 — 112; 4 — 253; 5 — 280

Рис. 5. Зависимость от частоты коэффициента затухания продольных волн в направлении нагружения образца карельского габбро, испытанных нагрузки σ , МПа:

1 — 34; 2 — 68; 3 — 112; 4 — 253; 5 — 280

подтверждает тот факт, что фазы сжатия и разрежения распространяются с различными скоростями.

Во второй серии измерений исследовалось влияние дефектности, возникающей при нагружении образцов, на форму, скорость распространения и коэффициент затухания импульсов упругих волн. Исследования проводились с изотропными образцами карельского габбро, в которых трещины первоначально отсутствовали. Все образцы подвергались циклическому одноосному нагружению σ , в направлении которого после снятия нагрузки проводились измерения. Максимальные значения напряжения каждого из пяти циклов нагружения составляли соответственно 34, 68, 112, 253 и 280 МПа. При дальнейшем нагружении до 295 МПа происходило разрушение образца.

Первоначально были определены частотные зависимости коэффициента затухания и скорости распространения продольных упругих волн в диапазоне $f = 1 \div 3,5$ МГц в образце, предварительно подвергнутом нагружению до 34 МПа. Соответствующие зависимости приведены на рис. 4, 5 (кривые 1). В образце, испытывавшем нагружение до 68 МПа, наблюдалось увеличение скорости ультразвука на 1 % (кривая 2 на рис. 4), что было связано с его уплотнением в направлении зондирования. При этом, как видно из рис. 4, дисперсия скорости во всем исследуемом диапазоне частот незначительна. Отмеченное увеличение скорости может быть зафиксировано также и по уменьшению времени распространения импульса по образцу на 0,15 мкс (кривая 2 на рис. 6).

Наиболее чувствительным к уплотнению образца оказался коэффициент затухания, который на частоте 3 МГц при увеличении нагрузки от 34 до 68 МПа уменьшился на 17 % (кривые 1, 2 на рис. 5). При нагрузке $\sigma = 112$ МПа наблюдалось существенное увеличение акустической эмиссии и на поверхности образца появлялись микротрещины, очерчивающие контуры зерен. Измерения показали, что в этом случае скорость (кривая 3

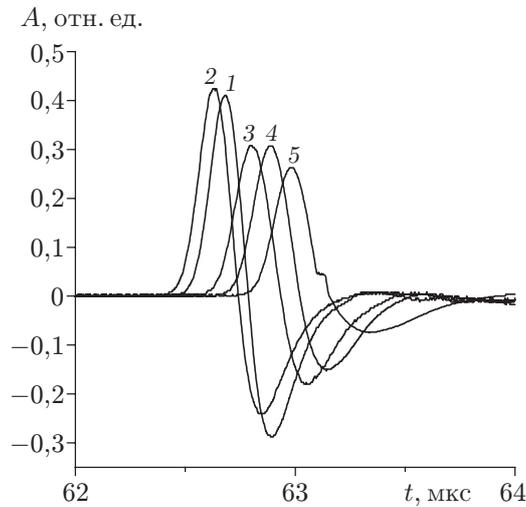


Рис. 6. Формы акустических сигналов, прошедших через образец карельского габбро в направлении нагружения при нагрузках σ , МПа:
1 — 34; 2 — 68; 3 — 112; 4 — 253; 5 — 280

на рис. 4) уменьшается на 3 %, а коэффициент затухания (кривая 3 на рис. 5) соответственно увеличивается на 32 % на частоте 3 МГц относительно первоначального значения (кривые 1). При этом в форме импульсов, прошедших через нагруженные образцы, происходят следующие изменения. Опорный сигнал, как и в предыдущем случае, состоит в основном из фазы сжатия (см. рис. 2). В акустическом сигнале (кривая 1 на рис. 6), прошедшем через образец после первоначальной нагрузки $\sigma = 34$ МПа, за счет дифракции и рассеяния соотношение амплитуд фаз становится равным 1,5 : 1, т. е. происходит существенное увеличение амплитуды фазы разрежения. После нагрузок, меньших 112 МПа, сильных искажений в форме импульса не наблюдается (кривая 2 на рис. 6). Образование микротрещин (при $\sigma = 112$ МПа) приводит к существенному уменьшению амплитуды фазы разрежения (кривая 3 на рис. 6). Увеличение одноосного нагружения до 253 МПа приводило к росту числа микротрещин и соответствующему уменьшению фазы разрежения. Соотношение амплитуд двух фаз биполярного импульса равнялось 2 : 1. При нагрузке $\sigma = 280$ МПа образовалась макротрещина протяженностью более 2 см. В результате прохождения акустического сигнала через данную трещину наблюдалось разделение во времени двух фаз биполярного импульса при дальнейшем уменьшении амплитуды фазы разрежения и увеличении ее длительности (кривая 5 на рис. 6). Данному процессу соответствовали уменьшение скорости распространения продольных волн (кривая 5 на рис. 4) и увеличение коэффициента затухания (кривая 5 на рис. 5) во всем исследуемом частотном диапазоне. При нагрузке $\sigma = 295$ МПа произошло механическое разрушение образца.

Выводы. Исследование образцов карельского габбро показало, что в результате прохождения через них короткого импульса упругих продольных волн нелинейность проявляется в искажении формы указанного импульса. При незначительном количестве микротрещин нелинейная трансформация импульсных сигналов в соответствии с теоретическими оценками, приведенными в работах [11, 13], проявляется в том, что форма фазы сжатия практически не меняется, а амплитуда фазы разрежения уменьшается. При наличии трещин глубиной раскрытия ≈ 100 мкм и более нелинейное искажение вызывает различие скоростей распространения фаз сжатия и разрежения, т. е. происходит разделение во времени двух данных фаз. Такая возможность теоретически исследовалась в работе [12].

Таким образом, нелинейная трансформация формы ультразвуковых зондирующих сигналов может рассматриваться как эффективный инструмент для выявления и оценки параметров микротрещиноватости в образцах горных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чернышов С. Н.** Трещины горных пород. М.: Наука, 1983.
2. **Sobolev G. A., Ponomorev A. V., Tyurkin Yu. S.** The stages of earthquake preparation: laboratory experiment and field study // Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction. N. Y.: Kluwer Acad. Publ., 2000. P. 211–223.
3. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003.
4. **Ямщиков В. С., Шкуратник В. Л., Бобров А. В.** О количественной оценке микротрещиноватости горных пород ультразвуковым велосиметрическим методом // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1985. № 4. С. 110–114.
5. **Зименков С. В., Назаров В. Е.** Нелинейные акустические явления в образцах горных пород // Физика Земли. 1993. № 1. С. 13–18.
6. **Зайцев В. Ю., Колпаков А. Б., Назаров В. Е.** Детектирование акустических импульсов в речном песке. Эксперимент // Акуст. журн. 1999. Т. 45, № 2. С. 235–241.
7. **Pavlenko O. V.** Nonlinear seismic effects in soils: Numerical simulation and study // Bull. Seismol. Soc. of Amer. 2001. V. 91, N 2. P. 381–396.
8. **Nazarov V. E., Ostrovsky L. A., Soustova I. A., Sutin A. M.** Nonlinear acoustics of micro-inhomogeneous media // Phys. Earth and Planetary Interiors. 1988. V. 50, N 1. P. 65–73.
9. **Сутин А. М.** Генерация гармоник при распространении упругих волн в твердых нелинейных средах // Акуст. журн. 1989. Т. 35, № 4. С. 711–716.
10. **Guyet R. A., Johnson P. A.** Nonlinear mesoscopic elasticity: evidence for a new class materials // Physics Today. 1999. N 4. P. 30–36.
11. **Назаров В. Е., Радостин А. В., Островский Л. А., Соустова И. А.** Волновые процессы в средах с гистерезисной нелинейностью. Ч. 1 // Акуст. журн. 2003. Т. 49, № 3. С. 405–415.
12. **Gusev V.** Propagation of acoustic pulses in a medium with hysteretic nonlinearity prepared by preloading // Acta Acustica. 2003. V. 89. P. 445–450.
13. **Gusev V.** Propagation of acoustic pulses in material with hysteretic nonlinearity // J. Acoust. Soc. Amer. 2000. V. 107, N 6. P. 3047–3058.
14. **Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.** Теория упругости. М.: Наука, 1987.
15. **Mayergoyz I. D.** Hysteresis model from the mathematical and control theory point of view // J. Appl. Phys. 1985. V. 57, N 1. P. 3803–3805.
16. **Иньков В. Н., Черепецкая Е. Б., Шкуратник В. Л. и др.** Ультразвуковая эхоскопия геоматериалов с использованием термооптических источников продольных волн // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2004. № 3. С. 16–21.
17. **Белов М. А., Черепецкая Е. Б., Шкуратник В. Л. и др.** Количественная оценка размеров минеральных зерен методом лазерной ультразвуковой спектроскопии // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 2003. № 5. С. 3–8.

Поступила в редакцию 1/XI 2004 г.