

УДК 622.611.4:620179.16

**А.А. Закиров, В.Н. Иньков, Е.Б. Черепецкая**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ  
ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ  
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ  
ВЫВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД\***

*Показана необходимость выявления сомкнутых трещин в образцах горных пород, подлежащих исследованию на степень выветривания методом лазерной ультразвуковой спектроскопии. Установлено, что трещина может быть выявлена по нелинейным эффектам прошедших через нее УЗ сигналов.*

*Ключевые слова: лазерно-ультразвуковая спектроскопия, нелинейная трансформация сигналов, выветривание горных пород.*

**A.A. Zakirov, V.N. Inkov,  
E.B. Cherepetskaya**

**THE NONLINEAR LASER ULTRASONIC SPECTROSCOPY APPLICATION IN THE ESTIMATION DEGREE PROBLEM OF ROCKS WEATHERING**

*The necessity of the dense cracks identification in rock samples to be a subject of the investigation of the plucking degree dimension using laser ultrasonic spectroscopy approach is shown. It is found that the crack can be identified on the base of nonlinear propagated ultrasonic signals transformation.*

*Key words: lazer ultrasonic spectroscopy, nonlinear transformation of signals, rocs weathering.*

**В**ыветривание представляет собой один из наиболее значимых процессов, снижающих прочностные и упругие свойства горных пород. Оно носит повсеместный и непрерывный характер, отличается чрезвычайным разнообразием и сложностью конкретных механизмов и проявлений, широким диапазоном влияния на состав, строение, структурно-текстурные особенности и свойства горных пород.

Неизбежным следствием этого влияния являются механическое разуплотнение, структурная дезинтеграция и, в конечном счете, разномасштабная нарушенность исходного геоматериала. Сведения о степени и границах этой нарушенности составляют неотъемлемую часть информационного обеспечения эффективного и безопасного ведения горных работ, строительства и эксплуатации подземных сооружений различного назначения.

Для оценки нарушенности горных пород под влиянием факторов выветривания в настоящее время используются разнообразные инженерно-геологические и геофизические методы. Принято считать, что среди последних наиболее эффективны акустические методы, информативные параметры которых связаны устойчивыми функциональными и корреляционными связями с плотностными, упругими и прочностными свойствами горных пород. Особое место среди акустических методов геоконтроля занимают так называемые ультразвуковые (УЗ) методы, основанные

\*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 08-05-00281-а.

на применении упругих волн различных типов, частота которых превышает 20 кГц и в ряде случаев может достигать 1 МГц и более. Указанные методы допускают проведение исследований как непосредственно в массиве, так и на образцах (керне), плитах и блоках горных пород, отличаются высокими информативностью, чувствительностью и пространственной разрешающей способностью.

В рамках УЗ методов в последние годы получило самостоятельное развитие такое направление как лазерно-ультразвуковая спектроскопия [1,2]. При использовании режима отраженных волн в специальном оптикоакустическом генераторе в результате поглощения лазерного излучения и последующего расширения нагретой области возбуждаются однополярные упругие импульсы продольных волн с длительностью порядка 20-100 нс (в зависимости от выбора генераторной среды) и амплитудой давления от 0,1 МПа до 10 МПа. Возникающий при этом однополярный импульс распространяется в исследуемую среду. Испытывая рассеяние на неоднородностях и дифракцию, зондирующий импульс уже на малых расстояниях превращается в биполярный, состоящий из фазы сжатия и фазы разрежения. При этом в спектре данного сигнала резко уменьшаются амплитуды низкочастотных гармоник за счет дифракции и подавляется высокочастотная часть спектра за счет рассеяния на дефектах.

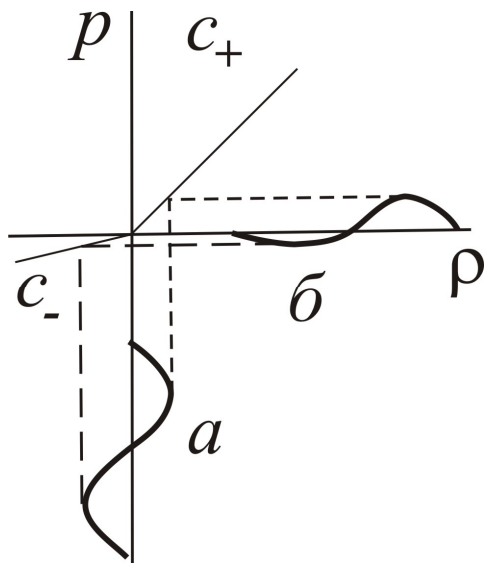
В режиме эхоскопии регистрируют рассеянную назад на структурных неоднородностях часть сигнала. Временной профиль и интенсивность рассеянного сигнала позволяют оценивать внутреннюю структуру исследуемого образца. Однако, если в акустическом треке присутствуют сигналы, отраженные от разномасштабных дефектов, то построение изображе-

ния становится проблематичным. Это связано в первую очередь с тем, что амплитуда импульса, отраженного даже от сомкнутой трещины, сравнима с амплитудой зондирующего сигнала. В результате этого импульс, дошедший до следующего за трещиной диагностируемого слоя столь мал, что сигнал, отраженный от зерен этого слоя будет неразличим на фоне шума. Таким образом, не удастся построить изображение слоя, расположенного за данным дефектом. Поэтому для повышения надежности выявления дефектов в образцах необходимо предварительно проверить, нет ли трещин в образцах. Обнаружить трещины традиционными методами при этом не представляется возможным.

В настоящей работе для выявления трещин предлагается использовать лазерно-ультразвуковую спектроскопию в режиме проходящих волн. В этом случае распространение мощного ультразвукового импульса в образце с системой горизонтальных или наклонных трещин приводит к проявлению нелинейных эффектов и дополнительному затуханию. Это в первую очередь связано с различными значениями модулей упругости при сжатии и растяжении. Данный эффект описывается в рамках бимодульной модели [3], в которой скорости распространения упругих волн для фазы сжатия ( $C_+$ ) и фазы разрежения ( $C_-$ ) различны, а связь приращения давления  $p$  в импульсе с приращением плотности  $\rho$  имеет вид (рис. 1):

$$p = \begin{cases} C_+^2 \rho, & \rho \geq 0 \\ C_-^2 \rho, & \rho < 0. \end{cases}$$

Как показано на рис. 1, для первоначально симметричного импульса продольной волны (рис. 1, а) при его



**Рис. 1. Искажение первоначально симметричного импульса (а) в результате прохождения через бимодульную среду (б)**

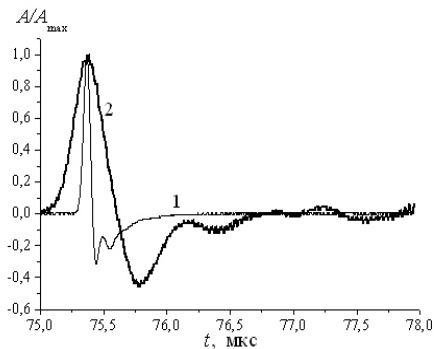
распространении в бимодульной среде, для которой отношение скоростей двух фаз  $C_+ / C_- = 1,3$ , наблюдается искажение его временного профиля, проявляющееся в том, что соотношение амплитуд двух фаз становится равным 1,7 (рис. 1, б). Кроме того, фаза разрежения приводит к дополнительному раскрытию трещин и дополнительной диссипации энергии на ее границах. Таким образом, в импульсе, прошедшем через область с трещинами, должны наблюдаться сильные искажения.

Экспериментальные исследования по наблюдению нелинейных искажений временных профилей ультразвуковых сигналов, прошедших через образцы пироксенов Ковдорского ГОКа, были проведены на установке «ГЕОСКАН-02М» [4]. Длительность лазерного импульса  $\tau_0$  составляла 10 нс, а его максимальное

значение энергии достигало значения 300 мДж. С помощью светофильтров энергия могла уменьшаться до 30 мДж. Радиус пучка составлял 5 мм. В результате поглощения лазерного импульса в генераторе возбуждались импульсы упругих продольных волн, длительностью 100 нс, а их амплитуда давления изменялась от 1 МПа до 10 МПа. Для измерения параметров акустических сигналов, прошедших через образец использовался иммерсионный метод: исследуемые образцы помещались в кювету с дистиллированной водой.

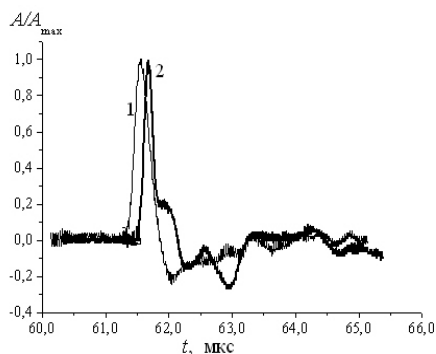
С использованием описанной аппаратуры проводилось ультразвуковое прозвучивание различных образцов пироксенов с целью выявления в них трещин. В опорном импульсе, прошедшем кювету с водой при отсутствии образца, наблюдались фазы сжатия и разрежения с соотношением амплитуд 5:1 (рис 2, кривая 1). Причем спектр такого сигнала простирался вплоть до 10 МГц. При прохождении данного импульса через образец (в котором отсутствовали трещины) дифракция и рассеяние на его неоднородностях приводили к уменьшению амплитуды фазы сжатия примерно на порядок и к заметному увеличению амплитуды фазы разрежения по отношению к фазе сжатия (кривая 2 на рис. 2; соотношение амплитуд фазы сжатия и разрежения оказывалось равным 1,5:1).

Кроме того, происходило увеличение длительности импульса в 3 раза в связи с рассеянием высокочастотной части спектра, в котором оставались частоты, не выше 3 МГц. Последующее увеличение энергии лазерного импульса приводило к увеличению амплитуды ультразвукового сигнала, прошедшего через образец. Временной профиль и, соответственно, его спектр не изменялись.



**Рис. 2. Временные профили опорного сигнала (кривая 1) и сигнала, прошедшего через образец пироксена (кривая 2) без трещин**

Нормировка выполнена на амплитуду фазы сжатия каждого сигнала



**Рис. 3. Временные профили сигналов, соответствующих различным энергиям  $E$  лазерного импульса через образец пироксена с горизонтальной трещиной: 1 -  $E = 30$  мДж, 2 -  $E = 300$  мДж.**

Нормировка выполнена на амплитуду фазы сжатия каждого сигнала

Наличие трещин в образце приводит к нелинейным искажениям в прошедшем сигнале. При малых энергиях лазерного импульса порядка 30-50 мДж наиболее явно проявляются эффекты, описанные в рамках бимодульной модели: наблюдается резкое уменьшение амплитуды фазы разрежения, а за счет меньшей

скорости распространения ( $C_- < C_+$ ) увеличивается ее длительность. Так для приведенного образца (рис.3, кривая 1) эта трансформация привела к уменьшению амплитуды фазы разрежения в 2,7 раз и увеличению ее длительности  $\tau$  от первоначального значения  $\tau_1 = 0,35$  мкс (в сигнале, прошедшем через область без трещины) до значения  $\tau_2 = 0,46$  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 образец без трещин. Увеличение амплитуды опорного сигнала приводит к дальнейшему уменьшению амплитуды фазы разрежения при росте амплитуды фазы сжатия, появляется разделение во времени двух фаз биполярного импульса (кривая 2 на рис. 3).

Наличие горизонтального участка I в акустическом треке подтверждает тот факт, что фазы сжатия и разрежения распространяются с различными скоростями.

Если энергия лазерного импульса достигала значения 300 мДж, то в результате действия фазы разрежения мощного упругого импульса происходит раскрытие трещины, на границах которой наблюдается интенсивная диссипация энергии. В результате этого процесса фаза разрежения практически полностью поглощается, а ее длительность увеличивается практически в 10 раз.

Таким образом, по нелинейной трансформации формы сигналов можно судить о наличии или отсутствии трещин и таким образом выделять образцы геоматериалов, по которым можно оценивать степень их выветривания на основе отраженных сигналов от неоднородностей или рассеянных на них.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов М.А., Карабутов А.А., Макаров В.А., Шкуратник В.Л., Черепецкая Е.Б., Подымова Н.Б. Количественная оценка размеров минеральных зерен методом лазерной ультразвуковой спектроскопии // ФТПРПИ. – 2003. - №5. – С.3-8.
2. Карабутов А.А., Макаров В.А., Шкуратник В.Л., Черепецкая Е.Б. Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. – Москва: «Горная книга», 2008. – 175 с.
3. Naugolnykh K.A., Ostrovsky L.A. Nonlinear Wave Processes in Acoustics. – Cambridge U.P., 1998.
4. Черепецкая Е.Б., Белов М.А. Об особенностях измерений акустических характеристик горных пород на образцах малых размеров // ГИАБ. – 2004. - №10. – С.31-34. **ТАБ**

### Коротко об авторах

Закиров А.А. – старший преподаватель кафедры математики,  
Иньков В.Н. – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики,  
Черепецкая Е.Б. – доктор технических наук, профессор кафедры ФТКП,  
Московский государственный горный университет,  
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru



---

## ДИССЕРТАЦИИ ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ</b>			
АГАФОНОВ Валерий Владимирович	Разработка научно-методического обеспечения формирования стратегии устойчивого развития горно-технических систем угольных шахт	25.00.21	д.т.н.
ИВАНОВ Виталий Юрьевич	Обоснование параметров магнитно-импульсного способа разупрочнения коренных золотосодержащих руд при их рудоподготовке	25.00.20	к.т.н.
ВОТЯКОВ Михаил Викторович	Повышение полноты извлечения запасов калийных руд на основе закладки выработанного пространства галитовыми отходами	25.00.22	к.т.н.