

УДК 622.611.4:620179.16

**А.А. Закиров, В.Н. Иньков, Р.Г. Простяков,
Е.Б. Черепецкая**

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЫВЕТРИВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПО МОЩНОСТИ СТРУКТУРНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Представлен метод оценки степени выветривания горных пород, основанный на определении мощности «структурного» шума акустического трека, полученного в режиме лазерной ультразвуковой эхоскопии.

Ключевые слова: нарушенность структуры, горные породы, лазерная ультразвуковая эхоскопия, мощность «структурного» шума.

Выветривание представляет собой один из наиболее важных природных процессов, приводящих к разрушению горных пород. Оно носит непрерывный и повсеместный характер, отличается разнообразием конкретных механизмов и проявлений, широким диапазоном степени влияния на состав, строение, структурно-текстурные особенности и свойства горных пород [1]. Неизбежным следствием этого влияния является нарушенность исходного геоматериала, обусловленная его механическим разуплотнением и структурной дезинтеграцией. Скорость и степень выветривания существенно зависят от структурных и текстурных особенностей горных пород. Повышение интенсивности выветривания в зонах ведения горных работ связано с появлением новых плоскостей обнажений, сопровождающимся изменением естественных термодинамических и гидрогеологических условий. Комплексное влияние факторов выветривания обуславливает неоднородность зон выветривания по мощности и степени нарушенности. Другими слова-

ми, процесс выветривания представляет собой сложный многофакторный объект исследования.

Геофизические методы основаны на изучении природы, структуры, пространственной неоднородности и временной изменчивости естественных и искусственных физических полей в горных породах. Наиболее эффективными принято считать акустические методы, поскольку их информативные параметры связаны устойчивыми корреляционными связями с плотностными, упругими и прочностными свойствами горных пород. Тем самым имеется возможность интегральной оценки нарушенности пород.

Из используемых акустических методов следует выделить так называемые ультразвуковые методы [2]. Они основаны на использовании упругих волн различных типов: продольных, поперечных и сдвиговых. Ультразвуковые методы допускают проведение исследований как непосредственно в массиве, так и на образцах, полученных из кернов. Указанные методы обладают высокой информативностью,

чувствительностью и пространственной разрешающей способностью. В качестве информативных параметров в этом случае используются кинематические характеристики импульсного акустического сигнала. Среди акустических методов исследования влияния выветривания на горные породы наиболее перспективным является метод акустической эхолокации [3].

В настоящей работе предлагается использовать метод лазерной ультразвуковой (УЗ) эхоскопии [4] для оценки степени нарушенности подверженных процессам выветривания образцов геоматериалов по результатам расчета суммарной мощности структурного акустического шума, возникающего в результате рассеяния упругих импульсов на неоднородностях в геоматериале.

Теоретическая модель

Идея метода заключается в следующем. Лазерный импульс 1 через прозрачную призму 2 из оргстекла падает на поверхность исследуемого образца 3 горной породы (рис. 1). Оптический импульс поглощается в приповерхностной области данного образца.

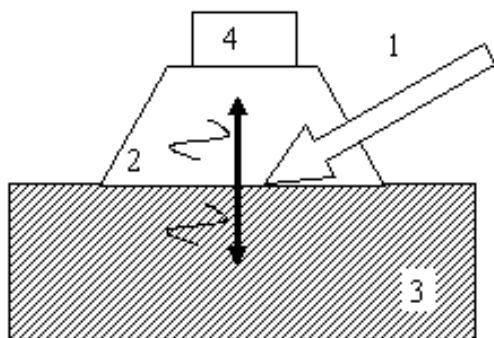


Рис. 1. Схема возбуждения ультразвуковых импульсов в режиме эхоскопии: 1 - лазерный импульс, 2 - прозрачная призма, 3 - исследуемый образец, 4 - широкополосный пьезоэлектрический приемник

Ее последующее расширение приводит к возбуждению двух мощных коротких УЗ импульсов. Первый из этих импульсов распространяется назад в оптически прозрачную среду к широкополосному пьезоэлектрическому приемнику 4. Он называется опорным. Второй импульс поступает в исследуемый образец. Амплитуды и временные профили каждого из этих импульсов определяются интенсивностью оптического пучка, длительностью лазерного импульса, коэффициентом поглощения света горной породой, а также соотношением $N = \rho_0 c_0 / \rho_1 c_1$ акустических импедансов $\rho_0 c_0$ оргстекла и $\rho_1 c_1$ исследуемой среды. Временной профиль и спектр импульса, распространяющегося к приемнику, строго контролируемы [4]. Длительность таких импульсов не превосходит 200 нс, а амплитуда давления достигает 2 МПа.

Распространяющийся в геоматериале импульс претерпевает рассеяние на неоднородностях, а также испытывает дифракцию. Рассеянная часть сигнала называется «структурным» шумом. Его характеристики несут информацию о нарушенности исследуемого образца и наличии дефектов в нем. Спектр зарегистрированного сигнала имеет гладкую часть и осциллирующую («шумовую») составляющую. Таким образом, измеренный спектр $S(\omega)$ равен:

$$S(\omega) = S_0(\omega) + S_1(\omega), \quad (1)$$

где $S_0(\omega)$ - спектр гладкой части, рассчитанный по формуле

$$S_0(\omega) = K_D(\omega) \frac{i\omega\alpha/c_0}{\alpha^2 + \omega^2/c_0^2} \exp\left(-\frac{\omega^2\tau_0^2}{4}\right), \quad (2)$$

$$K_D(\omega) = \frac{1}{1 + i2zc_0/(\omega b^2)}$$

- дифракционный множитель, b - ширина пучка, z - координата Z , c_0 - скорость ульт-

развука в среде), для гауссова пучка
 $f(t) = e^{-t^2/\tau_0^2}$ (τ_0 - характерная длительность лазерного импульса,

$f(\omega) = \exp\left(-\frac{\omega^2 \tau_0^2}{4}\right)$ - его спектр),

$S_1(\omega)$ - спектр осциллирующей составляющей, связанной с рассеиванием на дефектах. Поскольку $S_0(\omega)$ может быть достаточно точно рассчитан теоретически, осциллирующую составляющую можно найти как разность между экспериментально измеренным и теоретически рассчитанным спектрами:

$$S_1(\omega) = S(\omega) - S_0(\omega). \quad (3)$$

При этом $|S_1(\omega)|^2$ является спектральной плотностью структурного шума, а интеграл $\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |S_1(\omega)|^2 d\omega$ есть мощность «структурного» шума. Частота ω_{\min} определяется дифракцией и характеристиками приемного тракта, а частота ω_{\max} связана с затуханием высоких частот в исследуемом образце.

Степень нарушенности внутренней структуры образца будем характеризовать относительной мощностью K «структурного» шума:

$$K = \frac{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |S_1(\omega)|^2 d\omega}{\int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} |S_0(\omega)|^2 d\omega}. \quad (4)$$

Нормировочный коэффициент в знаменателе необходим для исключения влияния амплитуды эталонного импульса, зависящего от целого ряда меняющихся от образца к образцу факторов (качество акустических контактов, величина коэффициента поглощения лазерного излучения в сре-

де), на абсолютное значение мощности «структурного» шума. Мощность структурного шума должна возрастать при увеличении нарушенности образцов.

Экспериментальные исследования

Для апробации теоретической модели был проведен эксперимент на образцах мрамора Кибик-Кордонского месторождения. Образцы мрамора представляли собой пластины квадратной формы размером 50x50 мм и толщиной 5 мм.

Для каждого образца измерялись акустические треки методом лазерной УЗ эхоскопии [5] в нескольких точках на его поверхности. Исследование проводилось с использованием дефектоскопа УДЛ-2М при непосредственном поглощении лазерного излучения образцом [5]. Это было связано с тем, что для расчета амплитуды, временного профиля и спектра опорного сигнала необходимо было знать коэффициент поглощения света геоматериалом, который можно было рассчитать из временной зависимости давления в упругом импульсе. Передний фронт возбуждаемых сигналов имел экспоненциальный вид. При этом показатель экспоненты был равен произведению скорости распространения продольных волн c_0 в образцах геоматериала на коэффициент поглощения α лазерного излучения и на время t . Из данной зависимости определялись локальные значения коэффициента поглощения света в каждом образце. Эти значения для исследуемых образцов мрамора изменялись в диапазоне от 50 см⁻¹ до 70 см⁻¹. Возбуждаемые УЗ импульсы имели характерную длительность от 150 нс до 200 нс, что соответствовало основному частотному диапазону от 300 кГц до 7 МГц.

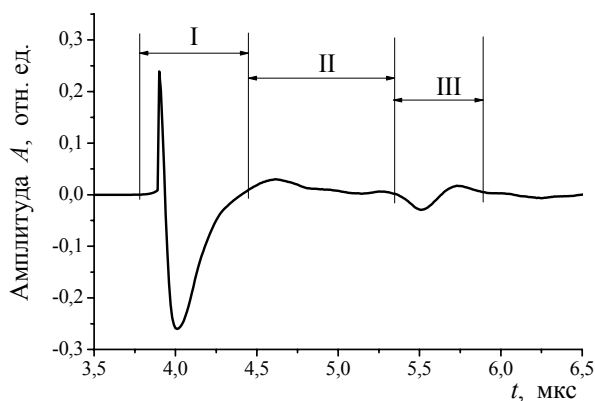


Рис. 2. Временной профиль отраженного акустического сигнала, пришедшего из образца мрамора до воздействия процессов выветривания: I – опорный сигнал, II – область сигнала, несущая информацию о структуре образца, III – донный сигнал.

После этого образцы подвергались полному циклу воздействий процессов выветривания, включая испытания на морозостойкость, солестойкость, кислотостойкость, атмосферостойкость и водостойкость. Морозостойкость, солестойкость, кислотостойкость образцов определялись по ГОСТ 30629-99 «Материалы и изделия облицовочные из горных пород. Методы испытания», атмосферостойкость и водостойкость – по методикам определения в лабораторных условиях долговечности облицовочного камня (В.В. Лашук, 1996 г.)

Обработка измеренных акустических треков

Пьезоприемник, входящий в состав дефектоскопа УДЛ-2М, регистрировал акустические треки, состоящие из опорного импульса (I, рис. 2), сигналов, рассеянных неоднородностями образца (II, рис. 2), и донного сигнала (III, рис. 2). По данному треку измерялась временная задержка между опорным и донным сигналами. При известной толщине образца определялась скорость распространения про-

дольных волн в нем. Далее в акустическом треке выделялась область, содержащая опорный сигнал (I, рис. 2) и часть сигнала (II, рис. 2), рассеянного на неоднородностях и несущего информацию о структурных особенностях образца. Используя быстрое преобразование Фурье, получали амплитудный спектр $S(\omega)$ (кривая 1 рис. 3, 4) данной части сигнала. Затем спектр опорного сигнала аппроксимировался теоретической зависимостью $S_0(\omega)$ (кривая 2 рис. 3, 4), рассчитанной с помощью

формулы (2) с использованием измеренного значения коэффициента поглощения лазерного излучения образцом. Этот спектр вычитался из результирующего спектра $S(\omega)$ (кривая 1 рис. 3, 4), и в результате оставался спектр $S_1(\omega)$ шумовой компоненты (кривая 3 рис. 3, 4). Затем вычислялся квадрат модуля спектра и проводилось суммирование по определенному частотному диапазону от ω_{\min} до ω_{\max} . Полученная сумма определяла мощность «структурного» шума. Затем она нормировалась на мощность опорного сигнала. В результате в соответствии с формулой (4) находилась относительная мощность K «структурного» шума, характеризующая нарушение образца. Для наиболее характерных образцов мрамора Кибик-Кордонского месторождения значения параметра K приведены в таблице.

Таким образом, относительная мощность «структурного» шума для образцов, прошедших полный цикл испытаний, возростала почти на

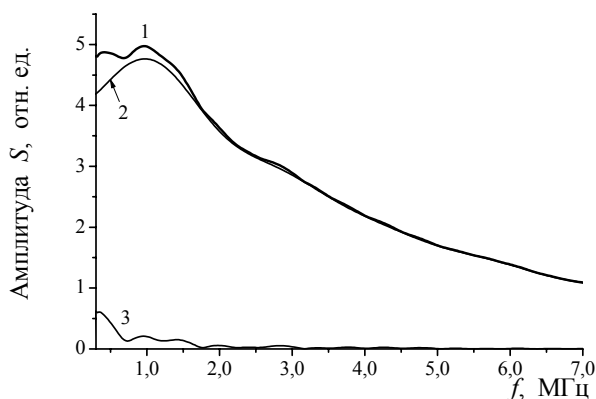


Рис. 3. Спектры акустического трека (1), опорного (2) и отраженного (3) от образца мрамора до воздействия процессов выветривания сигналов. Относительная мощность «структурного» шума $K=(3,4\pm 0,2)\cdot 10^{-3}$.

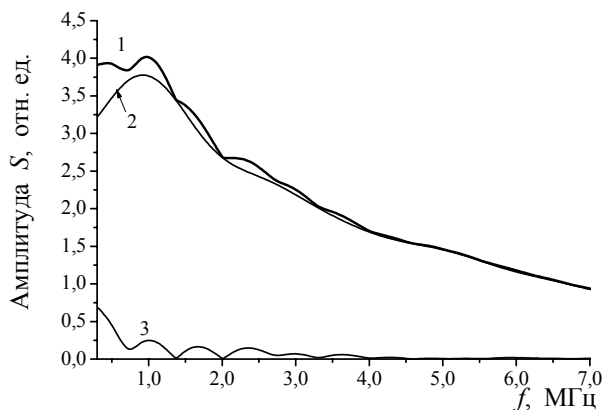


Рис. 4. Спектры акустического трека (1), опорного (2) и отраженного (3) от образца мрамора после воздействия процессов выветривания сигналов. Относительная мощность «структурного» шума $K=(2,4\pm 0,2)\cdot 10^{-2}$.

порядок, что свидетельствовало об увеличении нарушенности данных образцов. Указанные изменения подтверждались увеличением коэффициента затухания ультразвука и уменьшением скорости распространения ультразвуковых волн при исследовании данных образцов в режиме проходящих волн. Для дополнительного исследования изменения нарушенности образцов, подвергнутых процессам выветривания, они исследовались в режиме проходящих волн на установке «Геоскан - 02М» [4]. По результатам измерений рассчитывались частотные зависимости скорости распространения продольных волн и коэффициента затухания в диапазоне 1 МГц – 6 МГц. Оказалось, что скорость ультразвуковых волн в образцах, прошедших все циклы воздействий, уменьшалась в среднем на 15%, а коэффициент затухания увеличивался в среднем в 2,1 раза.

Приведенные теоретические расчеты и экспериментальные исследования показали, что коэффициент нормированной

Относительная мощность «структурного» шума K

	№ образца			
	MP 3	MP 7	MP 11	MP 14
До воздействия	$(3,4\pm 0,2)\cdot 10^{-3}$	$(4,1\pm 0,3)\cdot 10^{-3}$	$(3,8\pm 0,2)\cdot 10^{-3}$	$(5,2\pm 0,3)\cdot 10^{-3}$
После воздействия	$(2,4\pm 0,2)\cdot 10^{-2}$	$(3,2\pm 0,2)\cdot 10^{-2}$	$(2,8\pm 0,2)\cdot 10^{-2}$	$(3,6\pm 0,2)\cdot 10^{-2}$

мощности «структурного» шума может использоваться в качестве информативного параметра для оцен-

ки нарушенности горных пород под влиянием процессов выветривания.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузькин В.И., Кочетков М.В., Ярг Л.А. Техногенное выветривание на рудных месторождения. – М.: «Геоинформ-марк», 1993.
2. Шкуратник В.Л. Горная геофизика. Ультразвуковые методы. М. – МГИ, 1990.
3. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981.
4. Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, издательство «Горная книга», 2008. – 198с.: ил.

ИИAB

Коротко об авторах

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



РУКОПИСИ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Волошиновский К.И., соискатель ученой степени кандидата технических наук, ассистент кафедры АТ, Московский государственный горный университет, e-mail: volkir@mail.ru,
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС УЧЕТА ГАЗА НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОННОГО КОРРЕКТОРА SEVC-91 И КОНТРОЛЛЕРА ICP-DASI7188XB
(исходные тексты драйвера) (772/10-10 от 25.06.10) 2 с.

Voloshenovsky K.I., Competitor candidate of science degree at MSMU
MEASURING SYSTEM OF GAS ACCOUNTING ON THE BASIS OF ELECTRONIC SEVC-91
CORRECTOR AND ICP-DASI7188XB CONTROLLER (driver source)