

В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, А.А. Кормнов

**О ПРИНЦИПАХ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТРУКТУРНОЙ
ДИАГНОСТИКИ ПРИКОНТУРНОГО МАССИВА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОВЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ
СИГНАЛОВ***

Рассмотрены достоинства и недостатки методов импульсного ультразвукового (УЗ) прозвучивания и каротажа при оценке структурных неоднородностей и напряженного состояния массива в окрестностях горных выработок. Отмечено, что переход от импульсных к непрерывным шумовым УЗ сигналам со средним равным нулю и ограниченным спектром позволяет увеличить базы контроля за счет повышения закачиваемой в массив энергии и более эффективного возбуждения пьезоэлектрических преобразователей. Показано, что извлечение искомой информации о структурных особенностях приконтурного массива может базироваться на анализе взаимной и автокорреляционной функций ультразвуковых шумовых сигналов, прошедших исследуемый участок массива. Приведены аналитические выражения указанных функций, учитывающие частотноизбирательные свойства электроакустического тракта УЗ измерений, который рассматривается как линейная система с коэффициентом передачи, аналогичным фильтру нижних частот, крутизна которого зависит от степени поврежденности геосреды. Обоснованы энергетические, амплитудные, временные и частотные информативные параметры УЗ корреляционного метода геоконтроля. Представлены возможные схемы его реализации применительно к решению задач выявления границы основной и непосредственной кровли, наличия расслоений на этой границе, а также степени однородности и нарушенности пород кровли.

Ключевые слова: горные выработки, устойчивость, ультразвук, контроль, структура, шум, корреляционные методы, схемы измерений

Согласно принятой в инженерной геологии классификации оценка и прогноз фактического состояния горных выработок на определенный момент или промежуток времени относятся к разряду оперативных [1]. Они призваны характеризовать текущую структурную и функциональную устойчивость выработок на основе получения непрерывной или дискретно-непрерывной информации о структурной поврежденности и напряженно-деформированном состоянии (НДС)

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания №2014/97.

приконтурного массива, а также их изменений во времени и пространстве.

С середины 60-х годов прошлого века для получения указанной информации стал активно применяться ультразвуковой (УЗ) метод, реализуемый в вариантах межскважинного прозвучивания или каротажа горных пород в окрестностях выработок. При этом использовался изначально и продолжает использоваться до настоящего времени импульсный режим излучения УЗ сигналов, после приема которых на заданной базе L контроля, измеряются их кинематические и динамические информативные параметры. Чаще всего это время t_p между моментами излучения и приема указанных сигналов, которое далее пересчитывается в скорость распространения C_p продольных упругих волн в геосреде. Величина C_p , в свою очередь, коррелирует с НДС горных пород и степенью их нарушенности [2,3].

Описанный УЗ время-импульсный метод, обладая на сегодняшний день достаточно совершенным аппаратным обеспечением [4], имеет и ряд недостатков. Первый из них – это ограниченные базы контроля L_{max} и точность измерения величины t_p , что обусловлено высоким частотнозависимым затуханием ультразвука в горных породах, второй – низкая чувствительность параметра C_p по отношению к изменениям как структурной нарушенности контролируемых участков массива, так и их НДС [5].

Одним из перспективных направлений преодоления указанных недостатков представляется использование для УЗ контроля приконтурного массива шумовых зондирующих сигналов и их корреляционных характеристик в качестве информативных. Соответствующий метод контроля, получивший название корреляционного, впервые был предложен и опробован более 40 лет назад применительно к дефектоскопии блоков природного камня [6]. Было установлено, что использование шумовых зондирующих сигналов позволяет существенно увеличить возможные базы прозвучивания за счет значительной «закачиваемой» в массив акустической энергии и более эффективного возбуждения пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП). Однако, своего дальнейшего развития корреляционный метод так и не получил из-за существенных для того времени проблем аппаратного и методического характера. Сейчас, когда появилась реальная возможность решения указанных проблем, актуальной становится задача адаптации УЗ корреляционного

метода применительно к оценке состояния массива в окрестностях горных выработок. Первым шагом на пути решения этой задачи является теоретическое обоснование информативных параметров и схем реализации метода, чему и посвящена настоящая работа.

Независимо от конкретной схемы контроля участка массива между конкретными излучателем I_1 и приемниками Π_i УЗ сигналов будем рассматривать как линейные системы, частотные характеристики $H_i(f)$ которых аналогичны характеристикам фильтра нижних частот (рис. 1)

$$H_i(f) = \exp[-\alpha_i(f) \cdot L_i], \quad (1)$$

где $\alpha_i(f)$ – частотнозависимое затухание геосреды на базе L_i контроля между соответствующими излучателем и приемником.

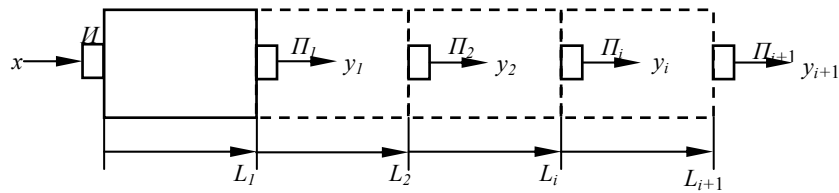


Рис. 1. Обобщенная схема УЗ корреляционного контроля геосреды

Пусть электрический сигнал x , возбуждающий излучающий ПЭП, представляет собой белый шум со средним равным нулю. Амплитудный спектр этого сигнала $G_x(f) = A = const$ при всех частотах f . Отметим, что полоса частот реального белого шума всегда конечна. В противном случае пришлось бы считать, что сигнал имеет либо бесконечную мощность, либо нулевую спектральную плотность. УЗ сигнал на выходе излучающего ПЭП с резонансной частотой f_0 имеет ограниченную полосу частот Δf , определяемого добротностью $Q = f_0 / \Delta f$. Откуда следует, что спектральная плотность амплитуд излученного УЗ сигнала при идеальной прямоугольной АЧХ ПЭП и его коэффициенте электроакустического преобразования k_1

$$G_{xu}(f) = \begin{cases} k_1 A & \text{при } (f_0 - \Delta f/2) \leq f \leq (f_0 + \Delta f/2) \\ 0 & \text{при } (f_0 - \Delta f/2) > f > (f_0 + \Delta f/2). \end{cases} \quad (2)$$

Если коэффициент акустоэлектрического преобразования приемных ПЭП равен k_2 , то с учетом (1) и (2) спектральная плотность амплитуд принятых сигналов может быть записана в виде

$$G_{y_i}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot H_i(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \exp[-\alpha_i(f) \cdot L_i], \quad (3)$$

$$G_{y_{(i+1)}}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot H_{i+1}(f) = A \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \exp[-\alpha_{i+1}(f) \cdot L_{i+1}]. \quad (4)$$

Используя соотношения (3), (4) и известные преобразования [7], связывающие корреляционные и спектральные характеристики ограниченных в полосе Δf шумовых сигналов со средним $\mu = 0$, получим

$$\begin{aligned} B_{y_i / y_{(i+1)}}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_{(i+1)}(t + \tau) dt = \\ &= (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp[-\alpha_i(f) L_i - \alpha_{(i+1)}(f) L_{(i+1)}] \times \\ &\times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B_{y_i / y_i}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t) y_i(t + \tau) dt = \\ &= (A^2 \cdot k_1^2 \cdot k_2^2 \cdot \pi \cdot \Delta f) \times \exp[-\alpha_i(f) L_i] \times \frac{\sin \pi \Delta f \tau}{\pi \cdot \Delta f \cdot \tau} \times \cos 2\pi \Delta f_0 \tau, \end{aligned} \quad (6)$$

где $B_{y_i / y_{(i+1)}}(\tau)$ – взаимная корреляционная функция сигналов (ВКФ) y_i и $y_{(i+1)}$, $B_{y_i / y_i}(\tau)$ – автокорреляционная функция (АКФ) сигнала y_i , T – время интегрирования корреляционного анализатора.

Функция (5) характеризует общую зависимость значений случайных шумовых сигналов, регистрируемых i -м и $(i+1)$ -м приемными ПЭП, а функция (6) – зависимость значений шумового сигнала в некоторый данный момент времени от его значений в некоторый момент в прошлом. В тоже время указанные функции должны характеризовать структурную неоднородность геосреды, что физически понятно, поскольку любые формы поврежденности последней должны приводить к декорреляции принимаемых сигналов.

В выражениях (5), (6): первый из сомножителей представляет собой константу, зависящую только от характеристик аппаратных элементов электроакустического тракта контроля; второй сомножитель отражает частотнозависимое затухание шумового сигнала на контролируемой базе геосреды, которое в решающей степени определяется ее поврежденностью; третий сомножитель описывает огибающую соответствующей корреляционной функции и при определенных схемах и методиках измерений может характеризовать степень структурной однородности геосреды и ее дефектность; четвертый сомножитель несет информацию о частоте максимума спектральной плотности принятого сигнала, которая определяется крутизной характеристики $H_{\lambda}(f)$, а значит и структурными особенностями, которым эта характеристика соответствует.

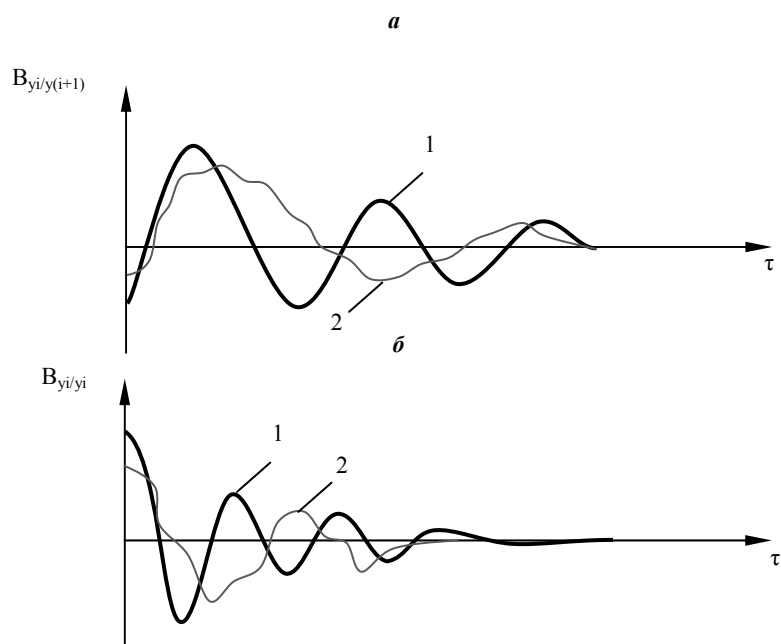


Рис. 2. Графики ВКФ (а) и АКФ (б) для условно структурно однородной (1) и нарушенной (2) геосреды

На рис. 2 представлены характерные теоретические графики функций (5) и (6) для условно ненарушенной однородной среды а также неоднородной геосреды со структурными нарушениями. Анализ этих графиков позволяет обосновать следующие информативные параметры корреляционного УЗ метода контроля. Во-первых, это связанные с затуханием УЗ сигнала значения $B_{y_i/y(i+1)}(0)$ и $B_{y_i/y_i}(0)$. Во-вторых, это величина периода τ_0 функций $B_{y_i/y(i+1)}$ и B_{y_i/y_i} , $\tau_0=1/f_0$. В третьих, смещение $\Delta\tau$ максимума функции $B_{y_i/y(i+1)}(\tau)$, которое соответствует времени задержки шумового УЗ сигнала на базе $L = L_{i+1} - L_i$, и позволяет определить скорость распространения этого сигнала $C = L/\Delta\tau$. В четвертых, коэффициенты корреляции ρ соответствующих функций. Для взаимной корреляционной функции

$$\rho_{y_i/y(i+1)}(\tau) = \frac{B_{y_i/y(i+1)}(\tau)}{\sqrt{B_{y_i}(0) \cdot B_{y(i+1)}(0)}}, \quad (7)$$

для автокорреляционной функции

$$\rho_{y_i/y_i}(\tau) = \frac{B_{y_i/y_i}(\tau)}{B_{y_i/y_i}(0)}. \quad (8)$$

С увеличением структурной поврежденности геосреды коэффициенты (7) и (8) уменьшаются, их максимальное значение $\rho \leq 1$, а минимальное $\rho = 0$.

Наконец, пятым информативным параметром УЗ корреляционного метода является интервал корреляции $\tau_{ик}$, который с увеличением поврежденности исследуемой геосреды будет уменьшаться. Выражения для определения $\tau_{ик}$ ВКФ и АКФ имеют следующий вид

$$\tau_{ик} = \frac{1}{B_{y_i/y(i+1)}(0)} \int_{-\infty}^{+\infty} B_{y_i/y(i+1)}(\tau) d\tau, \quad (9)$$

$$\tau_{ик} = \frac{1}{B_{y_i/y_i}(0)} \int_{-\infty}^{+\infty} B_{y_i/y_i}(\tau) d\tau, \quad (10)$$

Графическое определение величины $\tau_{ик}$ иллюстрируется рис. 3.

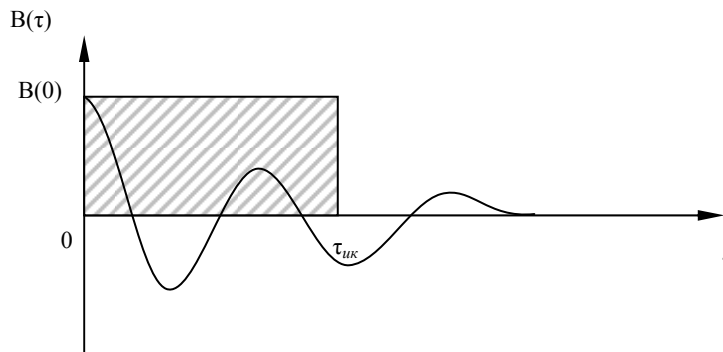


Рис. 3. Графическое нахождение интервала корреляции $\tau_{иК}$

В соответствии с рис. 3, значение $\tau_{иК}$ находится как сторона прямоугольника, вторая сторона которого равна $B(0)$, а его площадь равна площади под автокорреляционной (взаимной корреляционной) функцией.

Устойчивость горных выработок определяется прежде всего устойчивостью их кровли и в меньшей степени почвы и боковых пород. Поэтому ниже рассмотрим возможные схемы реализации УЗ корреляционного метода на примере контроля кровли, понимая при этом, что для оценки структурных неоднородностей почвы и боковых пород эти схемы также применимы.

Можно выделить следующие структурные особенности кровли, оказывающие существенное влияние на ее устойчивость: положение границы между основной и непосредственной кровлей и наличие расслоений на этой границе; степень однородности пород кровли и наличие в ней участков с повышенной трещиноватостью, а также преобладающее направление трещин на этих участках. Все указанные структурные особенности могут быть выявлены с использованием схем УЗ прозвучивания и каротажа, представленных на рис. 4.

Возможность определения границы между основной и непосредственной кровлей и наличия расслоений на этой границе с использованием схем каротажа на рис. 4а, и 4б и прозвучивания на рис. 4в очевидна. При пересечении Π_2 указанной границы должны скачкообразно изменяться корреляционные параметры: $B(0)\uparrow$, $\tau_0\uparrow$, $\Delta\tau\downarrow$, $\Delta\tau_{иК}\downarrow$, $\rho\downarrow$. Примерное постоянство

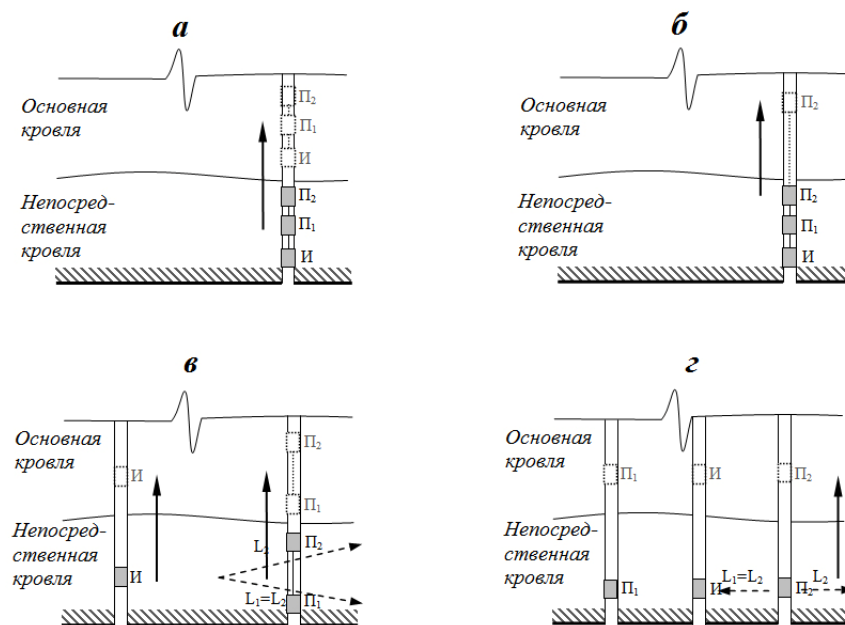


Рис. 4. Схемы ультразвуковых корреляционных измерений: каротаж с постоянным расстоянием l между приемными ПЭП (а); каротаж с изменяющимся расстоянием l между приемными ПЭП (б); межскважинное прозвучивание с симметричным расположением приемных ПЭП относительно излучателя при использовании ВКФ (в) и АКФ (г)

этих параметров по мере углубления скважинных зондов (в случае измерений по схемам 4а, 4б) или их плавное незначительное изменение (при измерениях по схеме 4б) свидетельствует об отсутствии каких-либо горизонтальных акустических границ и относительной однородности пород кровли. Выявление трещин, вертикальных или ориентированных под некоторым углом к поверхности кровли, возможно с использованием схем измерений на рис. 4в и 4г. Последние позволяют также выявлять структурные неоднородности массива за счет сравнения указанных выше корреляционных информативных параметров контроля на симметрично расположенных приемных ПЭП $П_1$ и $П_2$.

Таким образом, представленное теоретическое рассмотрение задачи УЗ диагностики структурной поврежденности по-

род кровли горных выработок свидетельствует о перспективности решения этой задачи на основе использования шумовых зондирующих сигналов и их корреляционной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. – Л.: Недра, 1986. – 272 с.
2. Ржевский В.В., Ямшиков В.С. Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. – М.: Наука, 1973. – 224 с.
3. Шкуратник В.Л., Данилов Г.В. Исследование влияния напряжений на скорость упругих волн в окрестностях эллиптической горной выработки // ФТПРПИ. – 2005. №3. С.3–10.
4. Шкуратник В.Л. Аппаратурное обеспечение ультразвуковых методов геоконтроля // Горный журнал. – 1999. №1. – С. 27-30.
5. Мамбетов Ш.А. Геоакустический контроль состояния массива пород вблизи горных выработок. – Фрунзе: Илим, 1978. – 172с.
6. Ямшиков В.С., Носов В.Н. К обоснованию ультразвукового корреляционного метода дефектоскопии крупноструктурных материалов // Дефектоскопия. – 1972. №3. – С.39 – 44.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1974. – 403 с. **ПЛАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Шкуратник Владимир Лазаревич¹ – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой ФТКП,
Николенко Пётр Владимирович¹ – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры ФТКП,
Кормнов Алексей Алексеевич¹ – аспирант кафедры ФТКП,
¹ftkp@mail.ru, Горный институт НИТУ «МИСиС».

UDC 622.02:539.2

PRINCIPLES OF ULTRASONIC STRUCTURAL DIAGNOSIS OF ROCK MASSIF USING NOISE PROBING SIGNALS

Shkuratnik V.L.¹, Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department FTKP
Nicolenco P.V.¹, PhD, Senior Lecturer, Department FTKP, ftkp@mail.ru,
Kormnov A.A.¹, Post — graduate student, Department FTKP, ftkp@mail.ru,
¹Mining Institute, National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia.

The advantages and disadvantages of impulse ultrasonic (US) tests and US logs tests in evaluation of structural inhomogeneities and stress condition of massif in area of mine workings are considered. It is noted that transition from impulse to continuous ultrasonic noise signals with a mean of zero and a limited spectrum can increase the base of control by increasing energy injected into massif and more efficient piezoelectric transducers excitation. It is shown that the extraction of required information of structural features of the rock massif can be based on analysis of cross- and autocorrelation functions of ultrasonic noise signals passed through investigated area of rock massif. The analytical expressions of these functions, took into account the frequency-selective properties of an electro-tract US measurements, which is regarded as a linear system with the transmission coefficient same as low pass filter, the slope of which depends on the degree of damage of geoenvironment are stated. Energy, amplitude, time and frequency informative parameters of ultrasonic correlation method are substantiated. Possible scheme of its implementation for solving problems of identifying the main border and direct roofing, the presence of bundles on this border, as well as the degree of homogeneity and the disturbance of the roof rocks are presented.

Key words: mining excavation, stability, ultrasonic, control, structure, noise, correlation methods, testing schemes

REFERENCES

1. Lomtadze V.D. Inzhenemaya geologiya mestorozhdeniy poleznykh is-kopaemykh. Leningrad, Nedra, 1986, 272 p.
2. Rzhavskiy V.V., Yamschikov V.S. Akusticheskie metody issledovaniya i kontrolya gornyykh porod v massive. Moscow, Nauka, 1973, 224 p.
3. Shkuratnik V.L., Danilov G.V. Issledovanie vliyaniya napryazheniy na skorost uprugih voln v okrestnostyakh ellipticheskoy gornoy vyirabotki // FTPRPI, 2005, no.3. pp.3-10.
4. Shkuratnik V.L. Apparaturnoe obespechenie ultrazvukovykh metodov geokontrolya // Gornyy zhurnal, 1999, no. 1, pp. 27-30.
5. Mambetov Sh.A. Geoakusticheskiy kontrol sostoyaniya massiva porod vblizi gornyykh vyirabotok. Frunze: Ilim, 1978, 172 pp.
6. Yamschikov V.S., Nosov V.N. K obosnovaniyu ultrazvukovogo korrelyatsionnogo metoda defektoskopii krupnostrukturnykh materialov // Defektoskopiya, 1972, no. 3, pp. 39 – 44.
7. Bendat Dzh., Pirsol A. Izmerenie i analiz sluchaynykh protsessov. Moscow, Mir, 1974, 403 p.

