

УДК 622.02:539.2

**ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО
КАРОТАЖА ДЛЯ СТРУКТУРНОЙ ДИАГНОСТИКИ
КРОВЛИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

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

*Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”
E-mail: ftkp@mail.ru,
Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия*

На основе компьютерного и физического моделирования исследовано влияние единичной трещины и слоистой структуры в кровле горной выработки на корреляционные характеристики стационарного непрерывного шумового акустического сигнала. Показано, что в отличие от традиционного время-импульсного метода структурной диагностики кровли использование указанного типа сигнала и нового способа обработки при каротажных измерениях позволяет повысить чувствительность и надежность изучения строения толщи пород, слагающих кровлю и ее нарушенность трещинами.

Кровля горных выработок, ультразвук, шумовой сигнал, корреляционный метод, контроль, трещина, структурная диагностика

Устойчивость кровли горных выработок зависит от совокупности горно-технологических и геологических условий, из которых только первые могут быть отнесены к разряду управляемых. Что касается геологических условий, то они заданы природой и управление ими невозможно. Более того, наши знания об этих условиях всегда ограничены, хотя именно они во многом определяют способ поддержания и качество прогноза устойчивости кровли [1, 2].

Важнейшими составляющими геологических условий в зоне выработки являются строение толщ горных пород, слагающих кровлю, и нарушенность этих толщ трещинами. Для получения информации об этих и других составляющих применяются различные геомеханические и геофизические методы [3,4], в частности акустический каротаж пробуренных в кровле скважин малого диаметра [5]. В качестве зондирующих сигналов традиционно используют ультразвуковые (УЗ) импульсы, а в качестве информативного параметра — скорость C_p распространения продольных упругих волн в прискважинной области массива [6–8]. Однако в ряде случаев кровля представлена слоями пород, для которых различия значений C_p столь незначительны [9], что получаемый скоростной разрез не позволяет идентифицировать разрез геологический. Что касается трещин, пересекающих контрольную скважину, то низкая чувствительность по отношению к ним величин C_p общеизвестна, особенно в случае, когда трещины сомкнуты или их заполнитель и вмещающие породы имеют близкие акустические характеристики [10].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания № 2014/113 (проект № 504).

Как показывает опыт гидроакустических исследований и акустической дефектоскопии материалов со структурой [11, 12], одним из направлений повышения чувствительности, надежности и помехозащищенности УЗ метода изучения структурных неоднородностей массива в окрестностях выработок может стать применение при каротаже непрерывных шумовых сигналов и анализ их корреляционных характеристик.

Оценке эффективности указанного направления на основе компьютерного и физического моделирования метода ультразвукового корреляционного каротажа посвящена настоящая работа.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Компьютерный эксперимент, основанный на использовании метода конечных элементов, достаточно широко используется для оценки устойчивости пород в окрестностях горных выработок [13, 14]. В настоящей работе он используется для установления влияния строения и нарушенности приконтурного массива на корреляционные характеристики шумового акустического сигнала. Моделирование осуществлялось применительно к схеме каротажа, представленной на рис. 1а. Она предполагает дискретное с шагом Δl перемещение вглубь массива акустического зонда, в котором приемные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) P_1 и P_2 размещены симметрично относительно излучающего ПЭП S . Последний является источником шумового стационарного акустического сигнала с нулевым средним. Считается, что все ПЭП имеют одинаковые резонансные частоты f_0 и полосы частот $\Delta f \approx 0.1f_0$.

С учетом особенностей указанной схемы среди всего многообразия информативных параметров корреляционного метода контроля [15] выбраны коэффициент взаимной корреляции R_{y_1/y_2} сигналов y_1 и y_2 на выходе приемных ПЭП P_1 и P_2 соответственно, а также отношение интервалов автокорреляции этих сигналов τ_{y_1} и τ_{y_2} :

$$R_{y_1/y_2}(t) = \frac{B_{y_1/y_2}(t)}{\sqrt{B_{y_1}(0)B_{y_2}(0)}}, \quad (1)$$

$$\frac{\tau_{y_1}}{\tau_{y_2}} = \frac{B_{y_2}(0) \int_0^{+\infty} B_{y_1}(\tau) d\tau}{B_{y_1}(0) \int_0^{+\infty} B_{y_2}(\tau) d\tau}. \quad (2)$$

Здесь B_{y_1/y_2} — взаимная корреляционная функция сигналов y_1 и y_2 ; B_{y_1} , B_{y_2} — их автокорреляционные функции, определяемые соотношениями [16]

$$B_{y_1/y_2}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T y_1(t)y_2(t+\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$B_{y_i/y_i}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t)y_i(t+\tau) d\tau, \quad (4)$$

где T — время интегрирования корреляционного анализатора, $i = 1, 2$.

В численных экспериментах исследовалось влияние на указанные информативные параметры единичной трещины, а также границы различных типов пород, пересекающих контрольную скважину.

Суть первого из компьютерных экспериментов сводилась к следующему. В осесимметричном пространстве задавалась модель массива в виде цилиндра, радиус и высота которого были много больше исследуемого при каротаже участка кровли. При этом граница последней совпадала с нижней границей цилиндра. В центре цилиндра со стороны выработки моделировалась

вертикальная скважина диаметром 80 мм и высотой 8 м. На высоте 1.5 м от границы кровли, представленной гипсом, задавалась симметричная относительно оси скважины и ортогональная ей трещина в виде квадрата со стороной 0.5 м. Раскрытие трещины составляло 0.1 мм, она была заполнена породой и имела пониженные относительно вмещающей трещину геосреды значения модуля упругости и плотности.

Наличие виртуального излучающего ПЭП S каротажного зонда отражалось в модели путем задания на грани конечного элемента граничных условий в виде горизонтальных перемещений, соответствующих реальному УЗ сигналу, возбуждаемому шумовым генератором. Наличие виртуальных приемных ПЭП P_1 и P_2 отражалось в модели путем регистрации горизонтальных смещений в точках, отстоящих вверх и вниз на 25 см от точки размещения излучателя S . Подобный зонд перемещался вверх по стенке скважины с шагом 25 см на глубину до 2.5 м (точкой отсчета считался центр зонда). В точке S в массив излучался шумовой акустический сигнал длительностью 10 мс. Эта длительность существенно меньше времени прохождения сигнала до вертикальных и верхней горизонтальной границ модели, что исключает влияние последних на результаты моделирования. Принятые в точках P_1 и P_2 сигналы подвергались корреляционной обработке, целью которой было нахождение величин R_{y_1/y_2} и τ_{y_1}/τ_{y_2} . В дополнение к указанным параметрам определялась скорость продольной волны C_p , измеряемая с учетом расстояния между излучающим и приемными преобразователями и времени первого вступления акустического сигнала.

Схема модели и результаты расчетов приведены на рис. 1. Анализ представленных данных показывает, что при приближении “зонда” к трещине коэффициент корреляции R_{y_1/y_2} начинает падать и достигает минимума в случае, когда трещина находится между излучателем и одним из приемных преобразователей. В точке, где излучатель находится ровно над трещиной, наблюдается локальное увеличение коэффициента R , что, очевидно, связано с симметричностью расположения приемных преобразователей. С точки зрения соотношения τ_{y_1}/τ_{y_2} полученный график следует интерпретировать следующим образом. В том случае, когда трещина находится между P_1 и S наблюдается резкое снижение интервала корреляции τ_{y_1} на преобразователе P_1 , что приводит к уменьшению отношения τ_{y_1}/τ_{y_2} . Напротив, в случае, когда трещина находится между S и P_2 , уменьшение τ_{y_2} приводит к росту величины τ_{y_1}/τ_{y_2} . В то же время относительное изменение величины C_p в зоне трещины составляет всего $\sim 2\%$, что соизмеримо с погрешностью большей части современной ультразвуковой аппаратуры геоконтроля. Отдельно следует отметить наличие зоны аномальных значений величин R_{y_1/y_2} и τ_{y_1}/τ_{y_2} вблизи от нижней горизонтальной границы модели. Такого рода отклонения связаны с отражением шумового сигнала от этой границы и его интерференционными искажениями, что и приводит к частичной декорреляции указанного сигнала на участке массива, не содержащем трещины.

Второй компьютерный эксперимент проводился с целью установления влияния на корреляционные параметры шумового сигнала границы между двумя слоями пород в кровле — гипсом и доломитом. Геометрические параметры модели, а также параметры “зонда” и шумового сигнала задавались такими же, как и в первом случае. Граница между породами пролегла на глубине 1.5 м. Схема компьютерной модели двуслойной среды и результаты расчетов соответствующих информативных параметров представлены на рис. 2.

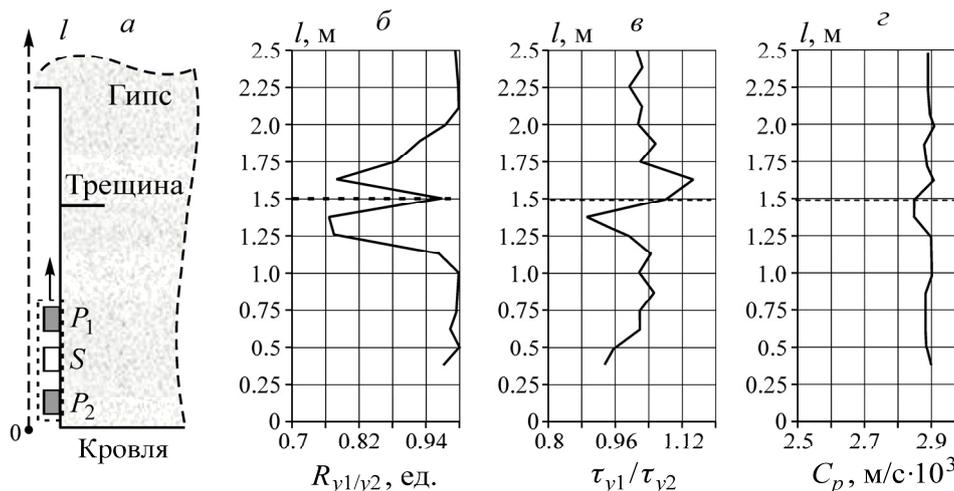


Рис. 1. Схема ультразвукового корреляционного каротажа, используемая при моделировании (а), зависимости изменения с глубиной параметров $R_{y1/y2}$ (б), τ_{y1}/τ_{y2} (в) и скорости продольной волны C_p (г) (пунктиром отмечено место расположения трещины)

Анализ приведенных на рис. 2 зависимостей показывает, что аналогично трещине граница между породами с различной акустической жесткостью вызывает декорреляцию шумового сигнала. При этом стоит отметить, что указанная граница частично отражает акустический сигнал, вызывая его интерференционную декорреляцию, когда зонд находится от границы еще относительно далеко.

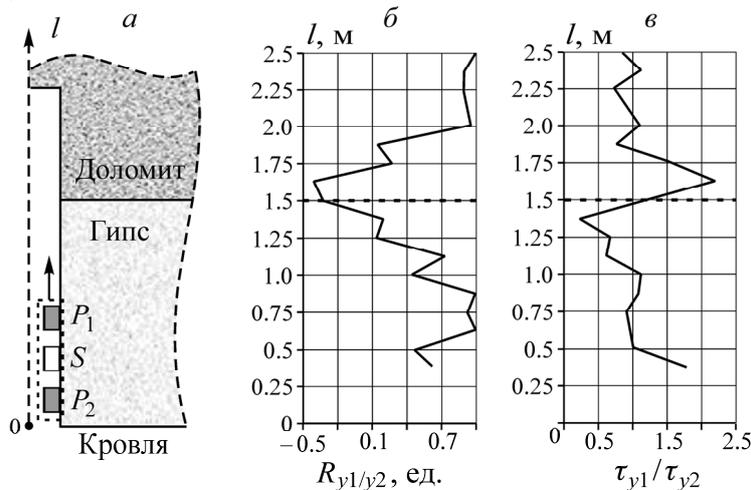


Рис. 2. Схема ультразвукового корреляционного каротажа, используемая при моделировании (а), результаты расчетов для коэффициента корреляции $R_{y1/y2}$ (б) и отношения τ_{y1}/τ_{y2} (в) (пунктиром отмечена граница между слоями)

Использованные при моделировании механические характеристики пород кровли и заполнителя трещины приведены в таблице (E — модуль Юнга, μ — коэффициент Пуассона, ρ — плотность).

Механические характеристики пород модели

Порода	E , ГПа	μ	ρ , кг/м ³
Гипс	14	0.30	2300
Нарушенный гипс (заполнитель трещины)	6	0.30	1200
Доломит	30	0.27	2850

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С целью подтверждения закономерностей, полученных при компьютерном моделировании массива с трещиной, проведены две серии лабораторных экспериментов. Обе серии выполнены на плите мрамора размерами $350 \times 320 \times 50$ мм с единичной сомкнутой трещиной, выходящей на поверхность длинной грани плиты на расстоянии 250 мм от ее ребра.

Суть первого эксперимента сводилась к следующему. Образец подвергался имитирующему каротаж поверхностному профилированию с использованием низкочастотного дефектоскопа УД2М-П. Профилирование велось по длинной стороне с постоянной базой 50 мм между излучающим S и приемным P преобразователями, которые имели резонансную частоту $f_0 = 150$ кГц и полосу пропускания $\Delta f = 15$ кГц. Основным информативным параметром контроля выступала скорость продольной волны C_p , получаемая с учетом определенного на дефектоскопе времени первого вступления импульсного УЗ сигнала. Схема проведения эксперимента и результаты профилирования представлены на рис. 3. В отличие от результатов компьютерного моделирования, на реальном объекте различия в скоростях продольных волн в областях, не содержащих и содержащих трещину, практически отсутствуют. Очевидно, что естественная неоднородность горной породы вызывает значительный разброс значений C_p , снижение которых в области трещины оказывается сравнительно незначительным.

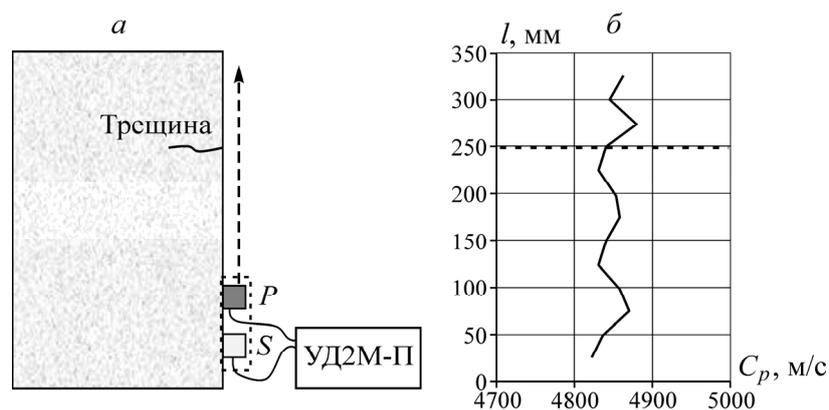


Рис. 3. Схема проведения лабораторного эксперимента (а) и результаты УЗ профилирования (б) (пунктиром показано место расположения трещины)

Второй эксперимент проводился на том же блоке мрамора, но уже по схеме шумового корреляционного каротажа с использованием одного излучающего и двух расположенных на равных расстояниях от него приемных преобразователей. Излучатель подключался к генератору шума, обеспечивающему генерацию шумового сигнала со средним, равным нулю. Амплитуда этого сигнала составляла 20 В, а его частотный диапазон от 10 до 500 кГц. Приемные ПЭП P_1 и P_2 подключались к двухканальному АЦП с частотой дискретизации 10 МГц, подключенному к персональному компьютеру. Основными информативными параметрами, как и в случае компьютерного моделирования, выступили коэффициент корреляции R_{y_1/y_2} сигналов на выходе приемных ПЭП P_1 и P_2 , а также отношение интервалов их автокорреляционных функций τ_{y_1} и τ_{y_2} соответственно. Расчет указанных информативных параметров производился программным путем. Прозвучивание осуществлялось с постоянной базой в 50 мм между излучающим и приемными преобразователями с шагом 25 мм вдоль профиля. Результаты лабораторных исследований представлены на рис. 4. Их анализ показывает, что в отличие от импульсного УЗ метода, проведенные корреляционные исследования позволяют достаточно отчетливо выявлять местоположе-

ние сомкнутой трещины в модели массива. Результаты лабораторного эксперимента качественно совпадают с результатами компьютерного исследования (см. рис. 1), а точность определения координаты трещины зависит от шага профилирования.

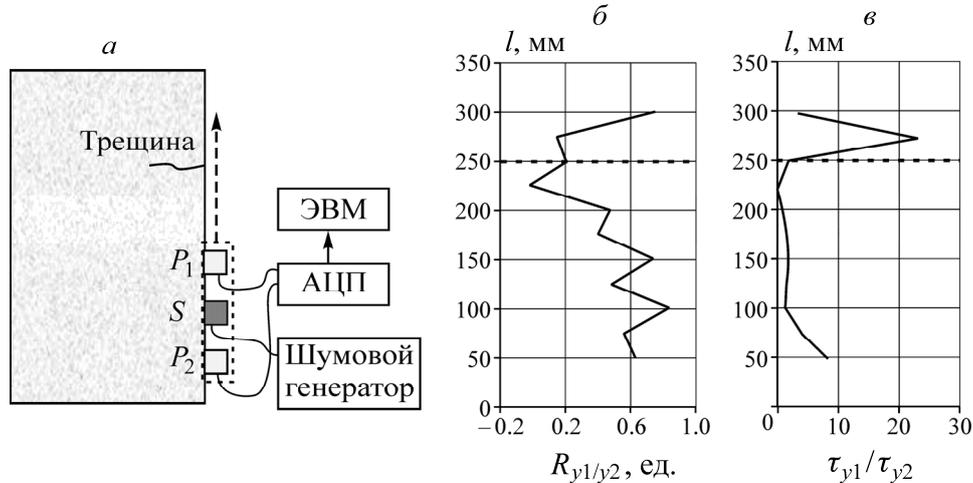


Рис. 4. Схема проведения шумового корреляционного контроля (а) и зарегистрированные изменения параметров $R_{y1/y2}$ (б) и τ_{y1}/τ_{y2} (в) вдоль исследуемого профиля (пунктиром показано место расположения трещины)

Для подтверждения закономерностей, полученных при компьютерном моделировании двухслойного массива, выполнен лабораторный эксперимент. Образец длиной 800 мм представлял собой склеенные пластины мрамора и плексигласа длиной 400 мм, шириной 400 мм и толщиной 50 мм. Профилирование образца с использованием шумового акустического сигнала велось по схеме, аналогичной схеме профилирования образца с единичной трещиной. Схема проведения измерений, а также зависимости $R_{y1/y2}$ и τ_{y1}/τ_{y2} в функции от l показаны на рис. 5.

Установленные в рамках лабораторного эксперимента закономерности полностью соответствуют таковым, полученным по результатам компьютерного моделирования как относительно снижения коэффициента $R_{y1/y2}$ на границе слоев, так и резкого уменьшения и последующего возрастания значения τ_{y1}/τ_{y2} на этой границе.

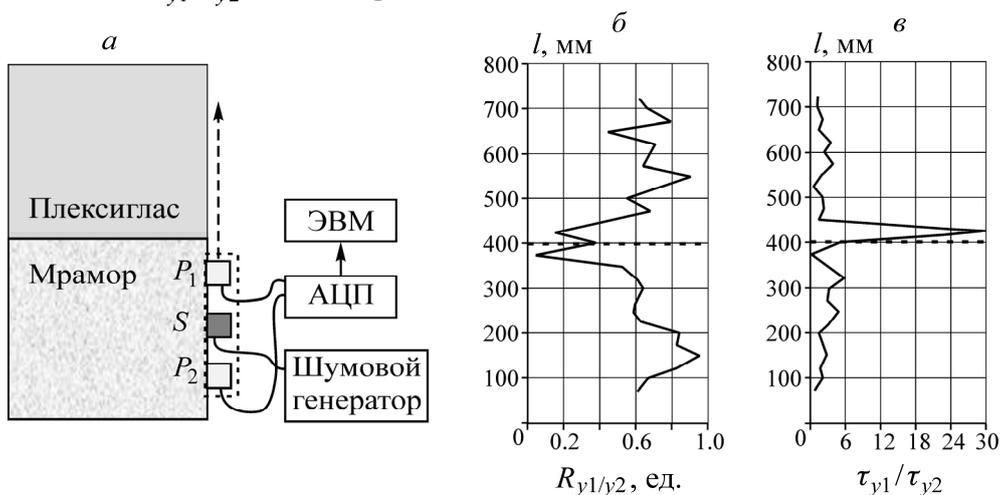


Рис. 5. Схема проведения шумового корреляционного контроля двухслойной среды (а) и зарегистрированные изменения параметров $R_{y1/y2}$ (б) и τ_{y1}/τ_{y2} (в) вдоль исследуемого профиля (пунктиром показано место границы слоев)

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного компьютерного и физического моделирования свидетельствуют о том, что потенциальные возможности ультразвуковых методов исследования структурных неоднородностей массива в окрестностях горных выработок далеко не исчерпаны. Для практической реализации таких возможностей необходим отход от традиционных, доминирующих сегодня подходов, при которых в качестве зондирующих используются импульсные УЗ сигналы, а в качестве информативных параметров — скорость их распространения в исследуемой геосреде.

В качестве более перспективных следует рассматривать подходы, предполагающие применение при каротажных ультразвуковых измерениях непрерывных стационарных шумовых сигналов и их корреляционной обработки, что позволит повысить не только чувствительность структурной диагностики пород кровли горных выработок, но и надежность и помехозащищенность такой диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ломтадзе В. Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. — Л.: Недра, 1986.
2. **Nazarova L. A., Nazarov L. A.** Dilatancy and the formation and evolution of disintegration zones in the vicinity of heterogeneities in a rock mass, *Journal of Mining Science*, 2009, Vol. 45, Issue 5.
3. **Shkuratnik V. L., Bochkareva T. N.** Theory of electroacoustic path during the interhole sonic testing of rocks surrounding a worked space, *Journal of Mining Science*, 1996, Vol. 32, Issue 6.
4. **Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V.** Using acoustic emission memory of composites in critical stress control in rock masses, *Journal of Mining Science*, 2013, Vol. 49, Issue 4.
5. **Kusznir N. J., Whitworth K. R.** Use of synthetic fracture logs derived from borehole geophysics to assess mine roof and floor quality International, *Journal of Mining Engineering*, 1983, Vol. 1, Issue 3.
6. **Nazarov L. A.** Determination of properties of structured rock mass by the acoustic method, *Journal of Mining Science*, 1999, Vol. 35, Issue 3.
7. **Shkuratnik V. L., Danilov G. V.** Investigation into the Influence of Stresses on the Velocities of Elastic Waves in the Vicinity of an Elliptical Mine Working, *Journal of Mining Science*, 2005, Vol. 41, Issue 5.
8. **Oyler D. C., Mark C., Molinda G. M.** In situ estimation of roof rock strength using sonic logging, *International Journal of Coal Geology*, 2010, Vol. 83, Issue 4.
9. **Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И.** Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник. — М.: Недра, 1994.
10. **Ржевский В. В., Ямщиков В. С.** Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве. — М.: Наука, 1973.
11. **Ольшевский В. В.** Статистические методы в гидролокации. — Л.: Судостроение, 1983.
12. **Ямщиков В. С., Носов В. Н.** К обоснованию ультразвукового корреляционного метода дефектоскопии крупноструктурных материалов // Дефектоскопия. — 1972, — № 3.
13. **Miletenko I. V., Miletenko N. A., Odintsev, V. N.** Modeling induced dislocation in host rocks around excavations, *Journal of Mining Science*, 2013, Vol. 49, Issue 6.
14. **Coggan J., Gao F., Stead D., and Elmo D.** Numerical modelling of the effects of weak immediate roof lithology on coal mine roadway stability, *International Journal of Coal Geology*, 2012, Vol. 90-91.
15. **Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кормнов А. А.** О принципах ультразвуковой структурной диагностики приконтурного массива с использованием шумовых зондирующих сигналов: труды междунар. науч. симп. “Неделя горняка-2015”. Отд. вып. ГИАБ. — М.: Горная книга, 2015. — № 0В1.
16. **Bendat J. S., Piersol A. G.** Random data: analysis and measurement procedures, Wiley, 2010.

Поступила в редакцию 11/II 2015