

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ГЕОЛОКАЦИИ**А. М. Эрперт, М. С. Дубицкая**

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВНЗ «НГУ») просп. Карла Маркса, 19, г. Днепрпетровск, 49600, Украина. E-mail: dubitskayam@gmail.com

Аналитическим путем установлено количество фактических акустических измерений состояния горного массива методом акустической геолокации, на основании которых можно с доверительной вероятностью говорить о наличии или отсутствии геологического нарушения. Результаты моделирования процесса экспериментального опробования массива методом акустической геолокации получены с помощью применения классического метода статистики с использованием t -критерия Стьюдента. По результатам моделирования процесса испытаний можно утверждать, что при $n_1=n_2=\{2, 3, 4\}$ наличие нарушений оценивается с вероятностью не менее 0,95.

Ключевые слова: t -критерий Стьюдента, акустическая геолокация, геологическое нарушение, выборка, закон распределения.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ГЕОЛОКАЦІЇ**О. М. Ерперт, М. С. Дубицкая**

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (ДВНЗ «НГУ») просп. Карла Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49600, Україна. E-mail: dubitskayam@gmail.com

Аналитичним шляхом встановлено кількість фактичних акустичних вимірювань стану гірського масиву методом акустичної геолокації, на підставі яких можна з довірчою ймовірністю говорити про наявність чи відсутність геологічного порушення. Результати моделювання процесу експериментального опробування масиву методом акустичної геолокації отримані за допомогою класичного методу статистики із застосуванням t -критерію Стьюдента. За результатами моделювання процесу випробувань можна стверджувати, що при $n_1=n_2=\{2, 3, 4\}$ наявність порушень оцінюється з ймовірністю не менш як 0,95.

Ключові слова: t -критерій Стьюдента, акустична геолокація, геологічне порушення, вибірка, закон розподілу.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одной из ключевых задач в современной угледобывающей отрасли в Украине является прогноз состояния породного массива при ведении горных работ. В шахтных условиях для получения необходимой информации о состоянии массива без нарушения его сплошности наиболее широко применяются сейсморазведка [1], электрометрические [2] и акустические [3, 4] методы. Одним из важнейших факторов, который напрямую влияет на эффективность применения современных средств выемки угля, является наличие мелко амплитудные разрывные тектонические нарушения. Внезапность встречи невыявленных разведкой разрывных тектонических нарушений создает значительные трудности для механизированной выемки угля. В результате это приводит к полным или частичным перенарезкам лав, что, соответственно, связано с резким снижением добычи, а также влечет за собой потери запасов угля в недрах, ухудшение технико-экономических показателей и условий труда горнорабочих.

Наиболее информативными из всех известных методов прогноза является акустический метод. Он основан на том, что породный массив – это неоднородная по своей структуре и свойствам природная среда. Любая неоднородность в нем тем или иным образом влияет на параметры прохождения акустического зондирующего сигнала (изменяется скорость, происходит поглощение энергии, отражение и преломление волн на структурных неоднородностях). Из теории геолокации следует, что, инициируя на входе массива сигнал с известными параметрами, можно из анализа формы сигнала, на выходе

из массива получить информацию о дисперсионных свойствах среды, расположенной между источником и приемником сигнала.

Одним из ключевых вопросов методики геолокации является вопрос о количестве фактических измерений, на основании которых можно с доверительной вероятностью говорить о наличии или отсутствии геологического нарушения. В работе была поставлена задача решения этого вопроса классическим методом статистики с использованием t -критерия Стьюдента. Этот критерий относится к одному из наиболее широко используемых методов статистического анализа. Чаще всего он применяется для проверки нулевой гипотезы о равенстве средних значений двух совокупностей, хотя существует также и одновыборочная модификация этого метода.

Цель работы – установление путей повышения надежности метода акустической геолокации.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. t -статистика строится обычно по следующему общему принципу [5]: в числителе случайная величина с нулевым математическим ожиданием (при выполнении нулевой гипотезы), а в знаменателе — выборочное стандартное отклонение этой случайной величины, получаемое как квадратный корень из несмещенной оценки дисперсии.

Для решения поставленной задачи примем две независимые выборки, полученные из генеральных совокупностей X и Y .

Выполним два эталонных оценивания объекта $n=20$ каждое, с условием а) нарушение есть (совокупность X) и б) нарушения нет (совокупность Y) (рис. 1).

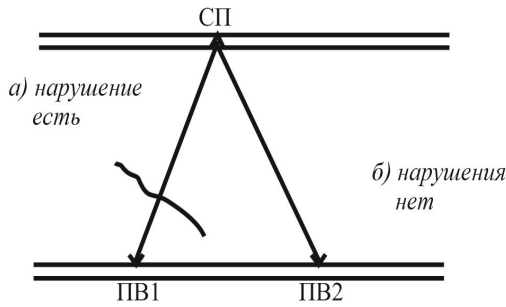


Рисунок 1 – Схема эталонного оценивания объекта

В случае наличия нарушения получаем следующий результат:

m_1 опытов подтверждают нарушение, $x=1$;
 $n-m_1$ из n опытов не подтверждают нарушение, $x=0$.

Тогда среднее значение \bar{x} и его дисперсия равны:

$$\bar{x} = 1 \cdot \frac{m_1}{n} + 0 \cdot \frac{n - m_1}{n} = \frac{m_1}{n},$$

$$S_x^2 = \left(1 - \frac{m_1}{n}\right)^2 \cdot \frac{m_1}{n} + \left(0 - \frac{(n - m_1)}{n}\right)^2 \cdot \frac{(n - m_1)}{n}.$$

При выполнении выборки из 20-ти эталонных оцениваний при наличии нарушений было получено $m_1=16$.

Аналогично в случае отсутствия нарушения получаем результат:

m_2 опытов подтверждают нарушение, $y=1$; $n-m_2$ опытов не подтверждают наличие нарушения, $y=0$.

Тогда среднее значение \bar{y} и его дисперсия имеют следующий вид:

$$\bar{y} = \frac{m_2}{n},$$

$$S_y^2 = \left(1 - \frac{m_2}{n}\right)^2 \cdot \frac{m_2}{n} + \left(0 - \frac{(n - m_2)}{n}\right)^2 \cdot \frac{(n - m_2)}{n}.$$

При выполнении выборки из 20 эталонных оцениваний при отсутствии нарушений было получено $m_2=5$.

Имеем, условно говоря, два распределения: \bar{x} и его дисперсия и \bar{y} и его дисперсия, при этом средние значения \bar{x} и \bar{y} при достаточно большом объеме выборки подчиняются нормальному закону распределения [6].

Выполняем фактическое опробование объема n_1 ($n_1 = 2, 3, 4, 5, \dots$). Из них n_2 опытов подтверждают нарушение, $z=1$, n_1-n_2 опытов не подтверждают нарушение, $z=0$.

Моменты распределения следующие:

$$\bar{z} = \frac{n_2}{n_1}.$$

$$S_z^2 = \left(1 - \frac{n_2}{n_1}\right) \cdot \frac{n_2}{n_1} + \left(0 - \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}\right)^2 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Определим различие средних значений \bar{x} и \bar{z} , и \bar{y} и \bar{z} по критерию Стьюдента. Если между \bar{x} и \bar{z} различия нет, то это свидетельствует о том, что подтверждается наличие нарушения, если же нет различия между \bar{y} и \bar{z} то это говорит о том, что нарушения не подтверждаются. Для проверки вычисляем статистики Стьюдента разностей средних значений по следующим формулам:

где

$$S_{d_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 + \sum_{j=1}^n (z_j - \bar{z})^2}{(n + n_1 - 2)}} \cdot \frac{n + n_1}{n \cdot n_1}$$

$$S_{d_2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + \sum_{j=1}^n (z_j - \bar{z})^2}{(n + n_1 - 2)}} \cdot \frac{n + n_1}{n \cdot n_1}.$$

Далее определяем число степеней свободы по формуле:

$$\nu = (n + n_1 - 2),$$

где n_1 – это число фактических экспериментов, а n – число эталонных экспериментов.

Задаем $n_1=2, 3, 4, \dots$ и определяем $t = t_{\text{Стьюд}}^{\text{крит}}$ при $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы ν , где α – уровень значимости, который определяет вероятность ошибки. При этом с доверительной вероятностью 0,95 наше утверждение справедливо.

В табл. 1 приведен фрагмент критических значений двустороннего t-критерия Стьюдента для выбранного уровня значимости 0,05.

Таблица 1 – Критические значения двустороннего t- критерия Стьюдента для уровня значимости 0,05

ν	$t = t_{\text{Стьюд}}^{\text{крит}}$
20	2,086
21	2,080
22	2,074
23	2,069
24	2,064
25	2,060

При некотором n_1 достигаем такого значения $t_{\text{Стьюд}}(x)$ или $t_{\text{Стьюд}}(y)$, которые меньше $t = t_{\text{Стьюд}}^{\text{крит}}$.

Если:

$$t_{\text{Стьюд}}^{\text{крит}} > t_{\text{Стьюд}}(x) \rightarrow \text{нарушение есть};$$

$$t_{\text{Стьюд}}^{\text{крит}} > t_{\text{Стьюд}}(y) \rightarrow \text{нарушения нет}.$$

Таким образом, вычисления выполняем для различных значений n_1 до тех пор, пока не будет вы-

полняться одно из двух заявленных равенств. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования процесса экспериментального опробования массива методом акустической геолокации

$n_1=2$	$n_2=2$	$v = 20$	2,086	нарушение есть
$S_{d_1}=0,297$	$S_{d_2} = 0,321$			
$n_1=2$	$n_2=1$	$v=20$		
$S_{d_1}=0,32$	$S_{d_2} = 0,342$			
$n_1=3$	$n_2=3$	$v=21$	2,080	нарушение есть
$S_{d_1}=0,242$	$S_{d_2} = 0,262$	0,828		
$n_1=3$	$n_2=2$	$v=21$		
$S_{d_1}=0,266$	$S_{d_2} = 0,284$	0,502		
$n_1=3$	$n_2=1$	$v=21$	2,080	
$S_{d_1}=0,266$	$S_{d_2} = 0,284$			
$n_1=4$	$n_2=4$	$v=22$	2,074	нарушение есть
$S_{d_1}=0,21$	$S_{d_2} = 0,209$			
$n_1=4$	$n_2=3$	$v=22$		
$S_{d_1}=0,23$	$S_{d_2} = 0,248$			
$n_1=4$	$n_2=2$	$v=22$	2,074	
$S_{d_1}=0,24$	$S_{d_2} = 0,255$			
$n_1=4$	$n_2=1$	$v=22$	0	нарушения нет
$S_{d_1}=0,23$	$S_{d_2} = 0,248$			
$n_1=5$	$n_2=5$	$v=23$	2,069	нарушение есть
$S_{d_1}=0,187$	$S_{d_2} = 0,202$			
$n_1=5$	$n_2=4$	$v=23$		нарушение есть
$S_{d_1}=0,208$	$S_{d_2} = 0,222$			
$n_1=5$	$n_2=3$	$v=23$	2,069	
$S_{d_1}=0,219$	$S_{d_2} = 0,232$			
$n_1=5$	$n_2=2$	$v=23$		
$S_{d_1}=0,22$	$S_{d_2} = 0,232$			
$n_1=5$	$n_2=1$	$v=23$	2,069	нарушения нет
$S_{d_1}=0,21$	$S_{d_2} = 0,222$			
$n_1 = 6$	$n_2=6$	$v=24$	2,064	нарушение есть
$S_{d_1}=0,17$	$S_{d_2} = 0,184$			
$n_1=6$	$n_2=5$	$v=24$		нарушение есть
$S_{d_1}=0,19$	$S_{d_2} = 0,203$			
$n_1=6$	$n_2=4$	$v=24$	2,064	
$S_{d_1} 0,202$	$S_{d_2} = 0,214$			
$n_1=6$	$n_2=3$	$v=24$		
$S_{d_1} 0,206$	$S_{d_2} = 0,218$			
$n_1=6$	$n_2=2$	$v=24$	2,064	нарушения нет
$S_{d_1}=0,20$	$S_{d_2} = 0,214$			
$n_1=6$	$n_2=1$	$v=24$		нарушения нет
$S_{d_1}=0,19$	$S_{d_2} = 0,203$			
$n_1=7$	$n_2=7$	$v=25$	2,060	нарушение есть
$S_{d_1}=0,157$	$S_{d_2} = 0,170$			
$n_1=7$	$n_2=6$	$v=25$		нарушение есть
$S_{d_1}=0,177$	$S_{d_2} = 0,188$			
$n_1=7$	$n_2=5$	$v=25$	2,060	нарушение есть

$S_{d_1}=0,19$	$S_{d_2}=0,2$			
$n_1=7$	$n_2=4$	$v=25$		
$S_{d_1}=0,195$	$S_{d_2}=0,205$		1,566	
$n_1=7$	$n_2=3$	$v=25$	2,060	
$S_{d_1}=0,195$	$S_{d_2}=0,205$		0,8697	
$n_1=7$	$n_2=2$	$v=25$		нарушения нет
$S_{d_1}=0,19$	$S_{d_2}=0,1998$		0,179	
$n_1=7$	$n_2=1$	$v=25$	2,060	нарушения нет
$S_{d_1}=0,177$	$S_{d_2}=0,189$			

ВЫВОДЫ. По результатам моделирования процесса испытаний можно утверждать, что при $n_1=n_2=\{2, 3, 4\}$ наличие нарушений оценивается с вероятностью не менее 0,95. При $n_1=\{4, 5, 6\}$ и $n_2=n_1-1$ вероятность наличия нарушения также не менее 0,95. Однако, по мнению авторов, надежным является проведение испытания с числом опытов $n_1=7$. В этом случае даже при $n_2=5$ наличие нарушений подтверждается. Однако, если $n_2 < 5$, то объем выборки следует увеличить для получения достоверного результата с заданной доверительной вероятностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк: ООО «АЛАН», 2003. – 312 с.
2. Паламарчук Т.А. теоретические аспекты виброакустического и электрометрического контроля кластерно-иерархических структур // Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остро-

градського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 1/2009(3). – С. 17–20.

3. Анализ структуры угольного пласта методом акустической геолокации / А.Н. Шашенко, В.Н. Журавлев, М.С. Дубицкая // Геотехническая и горная механика, машиностроение. – Днепропетровск: «Научный вестник НГУ», 2013. – № 3. – С. 65–71.

4. Neil D.M., Hanna K., Descour J.M. RockVision3D™ seismic tomography applications in bump-prone coal mines // Mine Planning and Equipment Selection 1999 & Mine Environmental and Economical Issues. – Dnipripetrovsk: NMUU of Ukraine, 1999. – PP. 509–520.

5. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 573 с.

6. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Ппрактикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФОРУМ, 2008. – 464 с.

WAYS OF RELIABILITY ENHANCEMENT OF THE ACOUSTIC GEOLOCATION METHOD

A. Erpert, M. Dubytskaya

State Higher Educational Institution «National Mining University»

prosp. Karl Marx Av., 19, Dnepropetrovsk, 49600, Ukraine. E-mail: dubitskayam@gmail.com

The authors have determined analytically the number of actual acoustic measurements of the rock mass condition by the acoustic geolocation method, which can be the ground for confidence probability presence indicator of geological faults. Within the frame of research they have obtained the results of modelling of the rock mass experimental testing by the acoustic geolocation method and via the classical statistical method using the Student's *t*-test. In accordance with the research finding, it is arguable that for $n_1 = n_2 = \{2, 3, 4\}$ the probability of presence of geological faults exceeds 0,95.

Key words: Student's *t*-test, acoustic geolocation, geological fault, sampling, distribution law.

REFERENSES

1. Antsyferov, A.V. (2003), *Teoriya i praktika shakhtnoi seisemorazvedki* [Theory and practice of mine seismic], ООО «АЛАН», Donetsk, Ukraine.

2. Palamarchuk, T.A. (2009), «Theoretical aspects of electrometrically and vibro-acoustic control of the cluster-hierarchical structure», *Modern resources and energy saving technologies in mining industry, Process innovation collection*, iss. 1(3), pp. 17–20, Kremenchuk, Ukraine.

3. Shashenko, A.N., Zhuravlev, V.N., Maslennykov, E.V., Dubitskaya M.S. (2013), «Analysis of structure coal layer by method of acoustic geolocation», *Geotechnical and rock mechanics, engineering, Scientific Bulletin of NMU*, no.3, pp. 65–71, Dnipropetrovsk, Ukraine.

4. Neil, D.M., Hanna, K., Descour, J.M. «RockVision3D™ seismic tomography applications in bump-

prone coal mines», *Mine Planning and Equipment Selection 1999 & Mine Environmental and Economical Issues 1999*, NMUU of Ukraine, Dnipripetrovsk, pp. 509–520.

5. Kremer, N.Sh. (2004), *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics], Tutorial, 2nd ed., rev. and add., YUNITI-DANA, Moscow, Russia.

6. Vukolov, E.A. (2008), *Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operatsii s ispolzovaniem paketov STATISTICA and EXCEL* [Fundamentals of statistical analysis. Practicum on the statistical methods and operations research using STATISTICA and EXCEL], Tutorial, 2nd ed., rev. and add. FORUM, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 20.05.2013.