

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.73.38.003

УДК 550.834

© О. В. Тайлаков, Е. А. Уткаев, С. В. Соколов, 2025

**О. В. ТАЙЛАКОВ**

д-р техн. наук, проф.,  
генеральный директор  
АО «НЦ ВостНИИ», г. Кемерово  
главный научный сотрудник  
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: oleg2579@gmail.com

**Е. А. УТКАЕВ**

канд. техн. наук.,  
старший научный сотрудник  
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: utkaev@mail.ru

**С. В. СОКОЛОВ**

канд. техн. наук.,  
старший научный сотрудник  
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово  
e-mail: sokoloviu.s@yandex.ru

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

*Приведен краткий аналитический обзор применения методов акустического зондирования в условиях горной промышленности. Рассмотрен подход по выявлению участков целиков с повышенной фильтрационными свойствами при использовании портативного комплекта оборудования в искробезопасном исполнении на основе регистрации акустического сигнала. Представлены результаты натурных исследований по оценке состояния целика в районе горной выработки.*

Ключевые слова: ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, АКУСТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА, МЕТАН, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ.

Акустическое зондирование представляет собой метод, основанный на использовании звуковых волн для исследования различных сред, включая атмосферу, водные объекты и твердые тела. Этот метод находит широкое применение в различных областях науки и техники, таких как геофизика, медицина, экология и других. К методам акустического зондирования относят активное и пассивное

зондирование. Активное зондирование включает генерацию звуковых волн с помощью специализированных устройств, таких как гидрофоны и акустические передатчики. Эти звуковые сигналы направляются в исследуемую среду, где они взаимодействуют с объектами и отражаются обратно к приемникам. Так, при геофизических исследованиях может использоваться сейсмическое зондирование,

которое позволяет исследовать структуру земной коры и выявлять месторождения полезных ископаемых. Сейсмические волны, генерируемые в результате взрывов или других источников, анализируются для получения информации о геологических формациях [1–3]. Пассивное зондирование основано на регистрации естественных звуковых волн, возникающих в результате различных процессов, таких как движение воды, взаимодействие животных или геологические явления. Этот метод не требует генерации звуковых сигналов, что делает его менее инвазивным и может использоваться для изучения землетрясений и других геофизических процессов, позволяя анализировать акустические сигналы, связанные с тектоническими движениями.

В горной промышленности метод акустического зондирования также нашел свое применение. Так, в работе [4] приведен анализ неоднородностей породного массива с позиций моделирования их с помощью акустического метода. Рассмотрены возможные физические модели отражения колебаний и их регистрации в выработке. Обоснован алгоритм моделирования структурных и силовых неоднородностей блока оперативного акустического контроля системы геомеханического мониторинга. Исходя из соотношения линейных размеров неоднородностей и диапазона волн акустических колебаний, реальным подходом к решению задачи моделирования структурных и силовых неоднородностей массива может быть метод, в основе которого в качестве источника колебаний используется шум от работы добычных или других механизмов в шахте.

В [5] излагается сущность акустического двухчастотного метода контроля напряженного состояния горного массива и область его применения. В качестве широкополосного источника акустических колебаний используется режущий орган действующего горного оборудования: комбайна, струга, отбойного молотка или коронки буровой штанги. Метод реализуется аппаратурой АК-1. Приемниками акустических колебаний являются

геофоны типа СВ-20 и СВ-30. Напряженное состояние оценивается по отношению высокочастотной и низкочастотной составляющих спектра. Показано, что это отношение зависит от напряженного состояния, свойств горного массива и расстояния между источником и приемником звука.

В [6] приведены способы автоматизированного контроля состояния массива в отрасли обеспечения безопасности рабочих на шахтах, которые разрабатывают пласты, склонные к газодинамическим явлениям. Реализация способов осуществляется аппаратурой АПСС-1 (производитель НПП «Интеграл») и обрабатывается на персональном компьютере по специальной программе Prognoz 4.0, разработанной МакНИИ. Также широко применяется разработанный в МакНИИ способ акустического зондирования. При помощи акустического зондирования исследуются пройденные горные выработки и находящиеся в проходке действующие очистные и подготовительные забои. Зондирование выполняется с промежуточной записью акустических сигналов цифровым шахтным регистратором РЦШ-1 с последующей обработкой по программе Zond, разработанной МакНИИ. Способ позволяет без наличия линий передачи акустического сигнала и аппаратуры АПСС-1 оперативно решать комплекс задач: оценка степени выбросоопасности и выделение участков повышенных напряжений в массиве, прогноз внезапных выдавливания угольного пласта, прорывов метана из почвы выработки, определение характера расслоений пород кровли и оценка устойчивости выработок, определение расстояний до выбросоопасного пласта, контроль эффективности установки анкерной крепи.

В [7] отображен опыт проведения геофизических исследований методом акустического зондирования в части контроля напряженно-деформированного состояния массива подземных горных выработок при помощи искробезопасного портативного регистратора акустических сигналов РИ-ПАС. На основе анализа данных, полученных

методом акустического зондирования, были построены карты трещиноватости, отображающие количество ослабленных межслоевых контактов в массиве горных пород, что позволило направленно применить меры по управлению кровлей.

Для регистрации искусственных акустических сигналов в условиях угольных шахт разработана аппаратура регистрации [8]. В работе представлены ее основные характеристики и методика выполнения акустических зондирований, позволяющих исследовать напряженно-деформированное состояние массива горных пород из горных выработок на основе разработанного программного обеспечения, перечень решаемых с его помощью задач и примеры их реализации.

Опыт применения метода акустического зондирования показал свою эффективность для контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород, состояния пласта в призабойной зоне, прогноза потенциально опасных участков по прорывам метана из почвы выработок при надрботке газоносных пластов-спутников, контроля положения выбросоопасного пласта относительно полевой выработки, определения участков потенциальной опасности по внезапным выбросам, горным ударам и выдавливаниям угля. Вместе с тем, для выявления участков целиков с повышенной фильтрационными свойствами воздуха будет применен портативный комплект оборудования в искробезопасном исполнении, предназначенный для регистрации акустического сигнала, и используется в подземных выработках шахт, в том числе опасных по газу и пыли.

Комплект включает в себя устройство записи акустического сигнала и геофон, который преобразует упругие колебания в электрический сигнал звуковой частоты. Преобразование акустических импульсов в цифровую запись осуществляется регистратором, обработка и анализ — специальным программным обеспечением. Программный продукт позволяет выполнить выделение

акустических импульсов, вычисление по ним амплитудно-частотных спектров, определение резонансных частот и их автоматизированный анализ.

Проведение геофизического обследования с бортов выработок спектрально-акустическим методом осуществлялось в два основных этапа (шахтные и камеральные работы).

Шахтные работы включают следующие основные этапы: выбор плоскости контролируемого объекта и привязка точек измерения к объектам шахты на плане горных работ; подготовка оборудования; инициация и регистрация сигнала.

Камеральные работы заключаются в подготовке и обработке исходных данных; анализе и интерпретации данных.

Зарегистрированный массив данных позволяет оценить ряд параметров акустического сигнала: резонансная частота ( $F_{max}$ ), Гц; нижняя граница средней амплитуды ( $f_n$ ), Гц; верхняя граница средней амплитуды ( $f_b$ ), Гц; нижняя граница повторного осреднения ( $f'_n$ ), Гц; верхняя граница повторного осреднения ( $f'_b$ ), Гц; максимальная энергия резонансной частоты ( $A_{max}$ ); низкочастотная составляющая ( $A_n$ ); высокочастотная составляющая ( $A_b$ ); общая энергия спектра ( $E_{общ}$ ); коэффициент относительных напряжений ( $K$ ); максимальное расстояние до активных по развитию деформаций контактов, распределения положения ослабленных контактов (развития деформаций).

Исследования проведены по двум профилям путевого бремсберга от ПК51 до ПК31. Акустическое зондирование выполнялось с шагом 10 м. Прогноз участков целиков с повышенной фильтрацией воздуха осуществлен с учетом предположения об их разупрочненном, менее связном и, следовательно, менее напряженном состоянии относительно устойчивых. Исследования осуществляется на основе оценки резонансных частот и выбора из них более интенсивных относительно прочих проявлений. При решении же стандартной задачи применения данного программно-аппаратного комплекса проводится оценка наличия в массиве горных пород anomalно

высоких напряжений, которое определяется на основе превышения пороговых значений параметрами  $A_v, f_H, f'_H$  и снижения параметра  $A_n$  ниже порогового значения.

Соответственно, решение обратной задачи, заключающейся в регистрации участков, характеризующихся минимальными напряжениями, при оценке состояния целика осуществлено на основе выявления максимальных значений параметра  $A_n$ , минимальных значений коэффициента относительных напряжений ( $K$ ) и анализа изменения результатов выполнения стандартной процедуры — определение относительной интенсивности расслоения горных пород вблизи исследуемых выработок.

По результатам проведенных исследований и обработки данных измерений построен график максимальных расстояний до активных по развитию деформаций контактов (рис. 2). Значения максимальных показателей отмечаются в зонах повышения низкочастотной составляющей.

Также на рис. 3 показан результат обработки данных, где представлен график коэффициента интенсивности ослабленных межслоевых контактов. Значения максимальных показателей отмечаются на участках понижения коэффициента относительных напряжений.

Положение ослабленных контактов представляется в виде горизонтальных линий на вертикальной оси: расстояние в метрах на вертикальной оси показывает положение

ослабленного контакта, а длина горизонтальной линии — интенсивность его относительного ослабления (интенсивности межслоевых деформаций).

В результате интерпретации данных выделяются характерные зоны, которые строятся в усредненных границах анализируемых параметров (коэффициента относительных напряжений; низкочастотной составляющей; максимальных расстояний до активных по развитию деформаций контактов; коэффициента интенсивности ослабленных межслоевых контактов (рис. 4).

По результатам выполненного геофизического обследования целиков в районе путевого бремсберга были выявлены пять зон с повышенной фильтрацией, в которых отмечено изменение четырех анализируемых параметров. Таким образом, данный метод позволяет оценить изменения фильтрационных характеристик угольных пластов из горных выработок в условиях действующих шахт.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0013 «Создание многофункциональных систем мониторинга и прогноза газодинамических явлений, контроля напряженного состояния, разработка методов их предотвращения и оценки эффективности при подземной разработке угольных месторождений. 2024–2025 гг.» (рег. № 124041100071-9).*

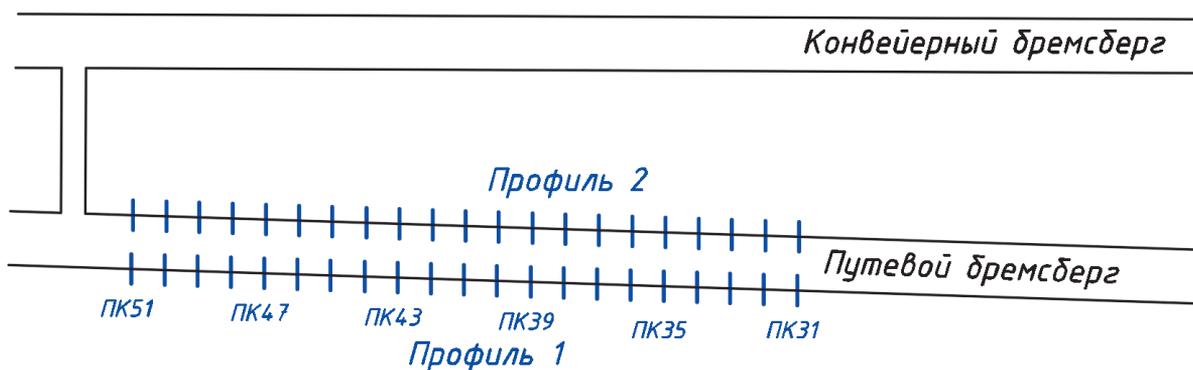


Рис. 1. Схема расположения точек измерения в путевом бремсберге

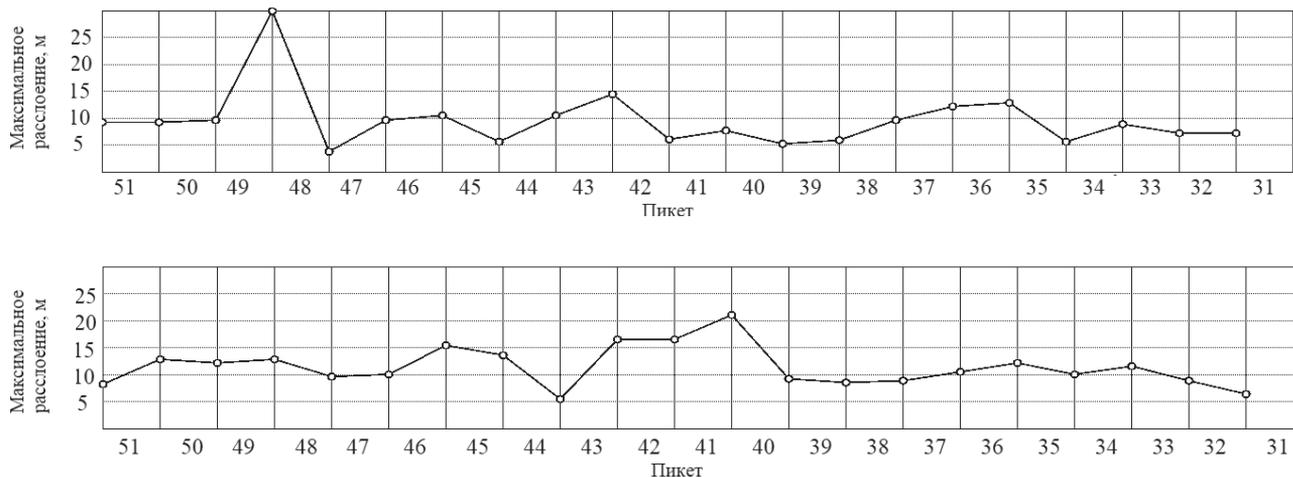


Рис. 2. Значения максимальных расстояний до активных по развитию деформаций контактов в путевом бремсберге по профилям: а) геофизический профиль № 1; б) геофизический профиль № 2.

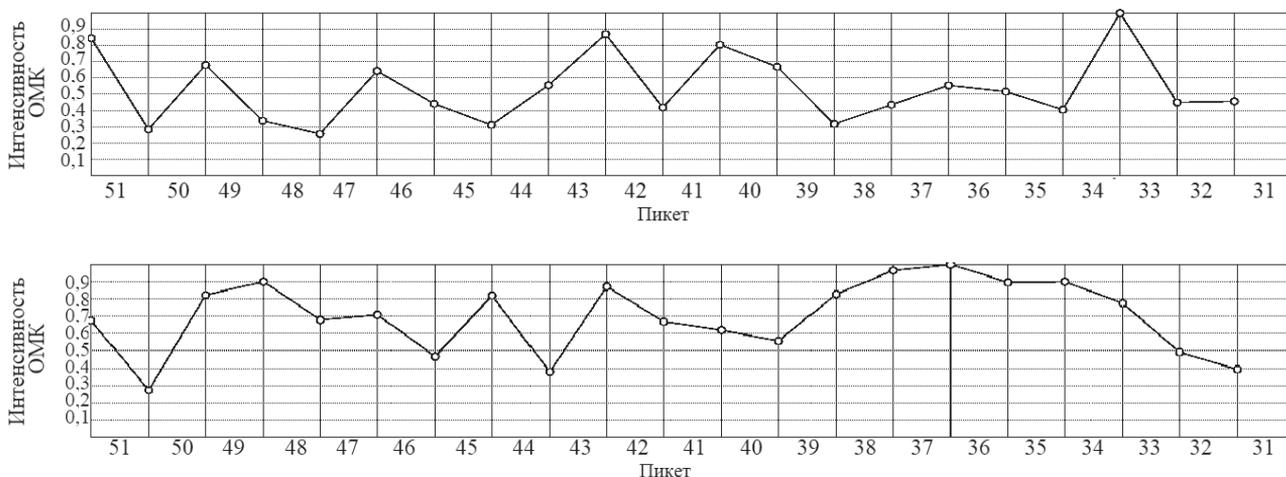


Рис. 3. Значения коэффициента интенсивности ослабленных межслоевых контактов в путевом бремсберге по профилям: а) геофизический профиль № 1; б) геофизический профиль №2.

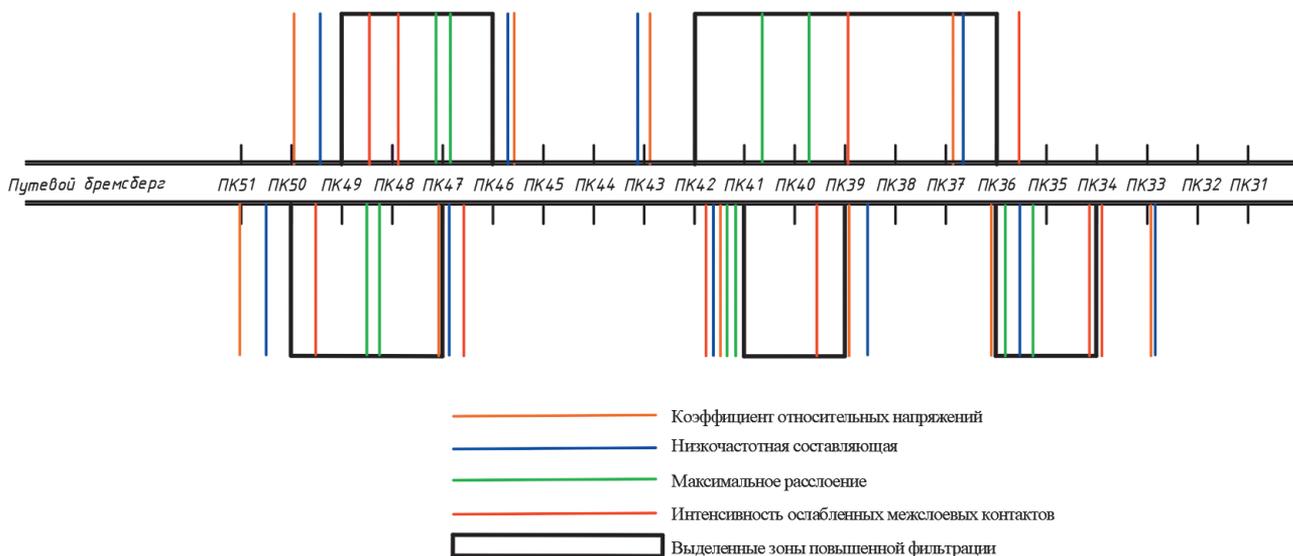


Рис. 4. Прогнозируемые зоны с повышенной фильтрацией

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азаров Н. Я., Яковлев Д. В. Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. М.: Недра, 1988. 199 с.
2. Анциферов А. В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. Донецк: ТОВ «АЛАН», 2003. 311 с.
3. Тайлаков О. В., Макеев М. П., Соколов С. В., Уткаев Е. А. Применение сейсмоакустического профилирования для уточнения условий залегания угольных пластов // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. научн. статей, Сиб. гос. индустр. ун-т; под общей ред. Фрянова В. Н. Новокузнецк, 2012. С. 266–267.
4. Шашенко А. Н. и др. Прогноз силовых и структурных неоднородностей в породном массиве методом акустического зондирования. 2008.
5. Шадрин А. В., Дегтярева М. В. Акустический двухчастотный метод контроля напряженного состояния горного массива // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 1–2. С. 55–59.
6. Никифоров А. В. и др. Современные способы контроля состояния массива в горных выработках // Инновационные перспективы Донбасса. 2015. С. 59–63.
7. Зяятдинов Д. Ф. и др. Опыт использования акустических исследований для контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород // Уголь. 2023. № 4 (1166). С. 31–36.
8. Горбачев А. С., Шилов В. И. Аппаратно-программное обеспечение акустических зондирований // Безопасность труда в промышленности. 2022. № 3. С. 20–25.

---

**DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.73.38.003**

**UDC 622.691, 62-623.1, 550.832.4**

**© O. V. Tailakov, E. A. Utkaev, S. V. Sokolov, 2025**

#### **O. V. TAILAKOV**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
General Director  
JSC «NC VostNII», Kemerovo  
Chief Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: oleg2579@gmail.com

#### **E. A. UTKAEV**

Candidate of Engineering Sciences,  
Senior Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: utkaev@mail.ru

#### **S. V. SOKOLOV**

Candidate of Engineering Sciences,  
Researcher  
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo  
e-mail: sokoloviu.s@yandex.ru

## FEATURES OF THE APPLICATION OF ACOUSTIC METHODS FOR MONITORING THE CONDITION OF A CARBONIFEROUS MASSIF IN AN OPERATING COAL MINE

*A brief analytical review of the application of acoustic sensing methods in the mining industry is given. An approach is considered to identify sections of pillars with increased filtration properties when using a portable set of equipment in an intrinsically safe design based on acoustic signal recording. The results of field studies to assess the condition of the rear sight in the mining area are presented.*

Keywords: GEOPHYSICAL RESEARCH, COAL SEAM, ACOUSTIC SOUNDING, FILTRATION PROPERTIES, METHANE, MINING, STRESS-STRAIN STATE.

### REFERENCES

1. Azarov N. Ya., Yakovlev D. V. Seismoacoustic method of forecasting mining and geological conditions of coal deposits. Moscow: Nedra, 1988. 199 p. [In Russ].
2. Antsiferov A.V. Theory and practice of mine seismic exploration. Donetsk: ALAN Publishing House, 2003. 311 p. [In Russ].
3. Tailakov O. V., Makeev M. P., Sokolov S. V., Utkaev E. A. Application of seismoacoustic profiling to clarify the conditions of occurrence of coal seams // High-tech technologies for the development and use of mineral resources: collection of scientific publications. articles, Sib. state. industry. Univ.; under general editorship. Fryanova V. N. Novokuznetsk, 2012. P. 266–267. [In Russ].
4. A. N. Shashenko and others. Prediction of force and structural inhomogeneities in a rock mass by acoustic sounding. 2008. [In Russ].
5. Shadrin A. V., Degtyareva M. V. Acoustic two-frequency method for monitoring the stress state of a mountain range // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2013. No. 1–2. P. 55–59. [In Russ].
6. Nikiforov A. V. and others. Modern methods of monitoring the condition of the massif in mining operations // Innovative perspectives of Donbass [Innovatsionnyye perspektivy Donbassa]. 2015. P. 59–63. [In Russ].
7. Zayatdinov D. F. and others. The experience of using acoustic research to control the stress-strain state of a rock mass // Coal [Ugol]. 2023. No. 4 (1166). P. 31–36. [In Russ].
8. Gorbachev A. S., Shilov V. I. Hardware and software for acoustic sensing // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2022. No. 3. P. 20–25. [In Russ].