

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.34.10.002

УДК 622.831.322

© А. С. Горбачев, В. И. Шилов, Д. А. Шилов, 2025

А. С. ГОРБАЧЕВ

Ведущий инженер

ООО МНТЛ «РИВАС», г. Москва, Россия

e-mail: info@rivas.ru

В. И. ШИЛОВ

Директор по науке

ООО МНТЛ «РИВАС», г. Москва, Россия

e-mail: 30shilov@gmail.com

Д. А. ШИЛОВ

Инженер по сервисному обслуживанию

ООО «РИВАС-Кузбасс», г. Новокузнецк, Россия

e-mail: Shilovdarivas@gmail.com

ПАРАМЕТРЫ ИСКУССТВЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В СЛОИСТОМ МАССИВЕ

В статье представлены результаты исследований в условиях слоистого массива горных пород угольных шахт параметров искусственных акустических сигналов, которые возникают в месте его возбуждения. Определены параметры, характеризующие напряженно-деформированное состояние массива, которые вычисляются по спектру искусственного сигнала: распределение ослабленных контактов, возникающих за счет развития межслоевых деформаций, коэффициент относительных напряжений, энергия отдельных резонансов и сигнала в целом, частота спектрального максимума, по величине которого вычисляется положение максимальных расслоений в массиве. Обоснованы методические приемы применения искусственных акустических сигналов при решении горно-геологических задач, включая прогнозирование динамических явлений и мониторинга массива.

Ключевые слова: ИСКУССТВЕННЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ СИГНАЛ, СПЕКТР СИГНАЛА, КОЭФФИЦИЕНТ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, АКУСТИЧЕСКИЕ ЗОНДИРОВАНИЯ.

Для решения горно-геологических задач при разработке угольных и рудных месторождений применяются геофизические методы, основанные на различных физических эффектах:

– возбуждение упругих колебаний. Регистрация и анализ продольных, поперечных, каналовых волн в различных методах (преломленные, отраженные волны, просвечивания). Частота анализируемого сигнала преимущественно до 500 Гц;

– регистрация естественных акустических импульсов, возникающих при образовании

трещин в массиве горных пород (акустическая эмиссия горного массива), и анализ их количества [1];

– локация источника возникновения естественного акустического сигнала и определение некоторых параметров массива [2];

– возбуждение и регистрация акустических сигналов, включая метод прозвучивания, в широком диапазоне частот — до нескольких кГц [3];

– возбуждение и прием искусственных акустических сигналов, возникающих при резонансных явлениях в слоистом массиве,

анализ их параметров для оценки состояния массива в пункте возбуждения.

Начало исследований применения искусственных акустических сигналов (ИАС) для контроля напряженного состояния горного массива относится к 80–90 годам прошлого столетия, в основном благодаря работам А. Г. Гликмана, С. В. Мирера. В результате были определены особые свойства ИАС, имеющие прикладное значение.

I. Под руководством С. В. Мирера на угольных шахтах выполнены исследования акустических записей работы горного оборудования (комбайн, отбойный молоток), полученных звукоулавливающей аппаратурой с применением аналоговых фильтров (ЗУА) при прогнозе выбросоопасности [4]. В результате определен безразмерный коэффициент K , равный отношению высокочастотной и низкочастотной составляющих одного спектра искусственного акустического сигнала, по которому получена возможность оценивать выбросоопасность массива горных пород в пункте возбуждения этого сигнала [5, 6]. Применение составляющих одного спектра акустического сигнала позволяло в месте возбуждения получать информацию о состоянии массива горных пород.

II. Работами Гликмана установлено, что механическое воздействие на слоистый массив горных пород служит источником возникновения резонансных колебаний, частота которых f_p обратно пропорциональна расстоянию от пункта возбуждения сигнала до резонирующего слоя h [7]:

$$f_p = \frac{V}{h}, \quad (1)$$

где V — фазовая скорость поперечных волн, равная 2500 м/с, определена эмпирическим путем.

По величине частоты f_p однозначно определяется расстояние от контакта возбуждения сигнала до ослабленного межслоевого контакта (ОМК), который и является резонирующим слоем. Амплитуда резонансного ИАС отражает добротность колебаний и

имеет прямую зависимость от степени ослабления контакта и характеристики приповерхностной зоны [8, 9].

Искусственный акустический сигнал при импульсном возбуждении колебаний может быть представлен в виде осциллограммы (рис. 1а) или спектральной плотности (далее — спектр), полученной в результате быстрого преобразования Фурье (рис. 1б).

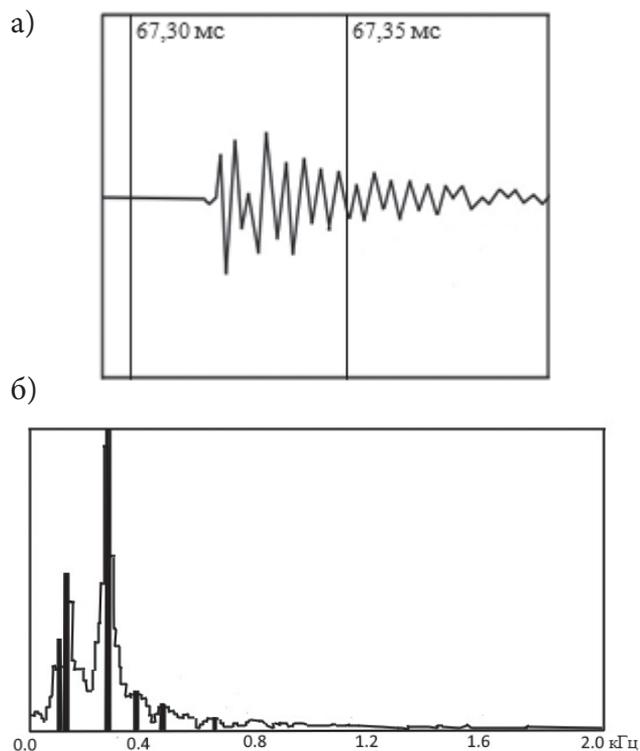


Рис. 1. Осциллограмма импульса акустического сигнала (а) и его Спектр искусственного акустического сигнала с выделенными резонансными частотами (б)

Дискретизация спектра ИАС 20 Гц приводит к различной точности определения расстояния до ОМК: частотам резонанса 40, 60, 80, 100 Гц соответствуют расстояния 62,5, 41,6, 31,25, 25 м. Продолжая приведенный ряд, можно установить, что точность в определении расстояния до ОМК 10 % будет при частоте 200 Гц и выше. При дискретизации спектра 20 Гц разность в положениях контакта в соседних значениях частоты в районе 200 Гц составляет 1,2 м, а в районе 1000 Гц для получения разницы 1,2 м в положении контакта разность частот должна быть около

300 Гц (15 полос спектра). Для сокращения такого различия применена процедура свертывания спектра — преобразование его частоты в логарифмический третьоктавный масштаб, в котором амплитуда равна среднему значению амплитуд двух соседних частот. На рис. 2 приведены исходный спектр ИАС (рис. 2а, интервал частот 20–800 Гц) и его третьоктавный спектр (рис. 2б), который при делении на две составляющие — низкочастотную A_H и высокочастотную A_B — охватывает все частоты от 20 до 5000 Гц. По этим составляющим, по аналогии с разработкой С. В. Мирера, и вычисляется безразмерный коэффициент K по формуле:

$$K = A_B / A_H. \quad (2)$$

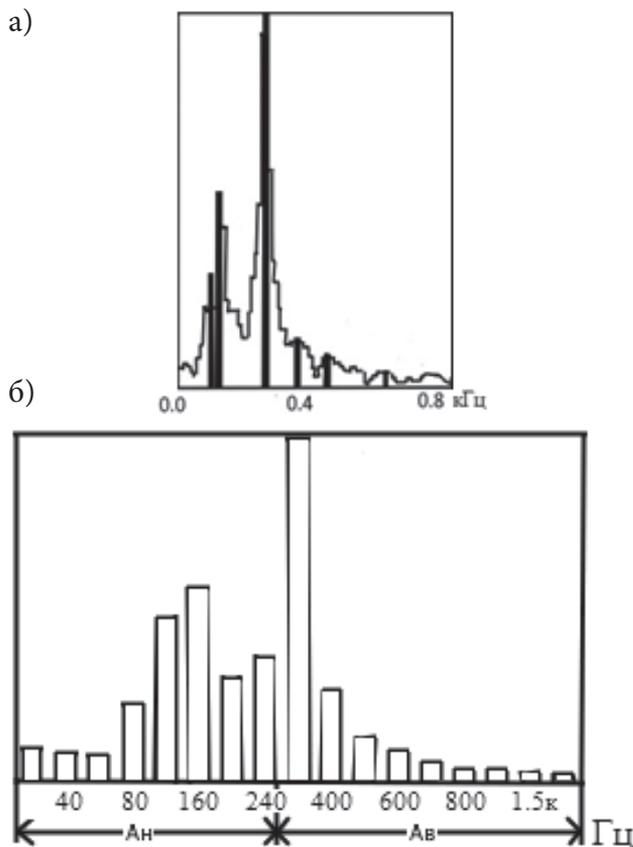


Рис. 2. Спектр искусственного акустического сигнала с выделенными резонансными частотами (а) и его третьоктавный спектр (б), разделенный на низкочастотную A_H и высокочастотную A_B составляющие

Деление спектра на составляющие выполняется на участке отсутствия аномальных

горно-геологических объектов таким образом, чтобы отношение A_B и A_H было близким 1,0. В таком случае увеличение значений K соответствует росту относительных напряжений в массиве, а уменьшение — относительной локальной разгрузке [10].

Формирование приповерхностной зоны для возникновения резонансных колебаний в массиве горных пород может быть обусловлено литологическим контактом, если он сопровождается перерывом в осадконакоплении, развитии микротрещин вдоль контакта, или сдвиговыми деформациями. Последние широко распространены в углевещающих породах в процессе выемки угля и их прогибания. При этом по закону прогибающейся балки в ее средней части возникают тангенциальные напряжения, приводящие к межслоевым деформациям. Поэтому в практике анализа спектров ИАС достаточно часто встречаются близкие к кратным резонансные частоты.

В качестве примера создания ослабленных зон вблизи контактов литологических и других границ на рис. 3 представлены геологическая колонка в подготовительной выработке, кровля которой закреплена анкерами длиной 2,7 м и по разряженной сети — канатными анкерами длиной 6 м, и спектр ИАС, зафиксированный в этой подготовительной выработке. В табл. 1 приведены данные резонансных частот и соответствующие им расстояния до ОМК по спектрам ИАС, полученным в горной выработке вблизи скважины с приведенной геологической колонкой. Как следует из таблицы, источником резонансных явлений служат как контакты литологических разностей (14,9–15,6 м, 7,8 м), так и межслоевые деформации в результате прогибания толщи пород (11,4 м, 3,9–4,8 м) и на краевых частях анкерной крепи (6,0 м, 2,7 м). При этом на отдельных участках горной выработки максимальными ослаблениями (отмечены знаком*) обладают контакты литологических разностей, межслоевых деформаций вследствие прогибающейся толщи пород и верхняя граница канатных анкеров.

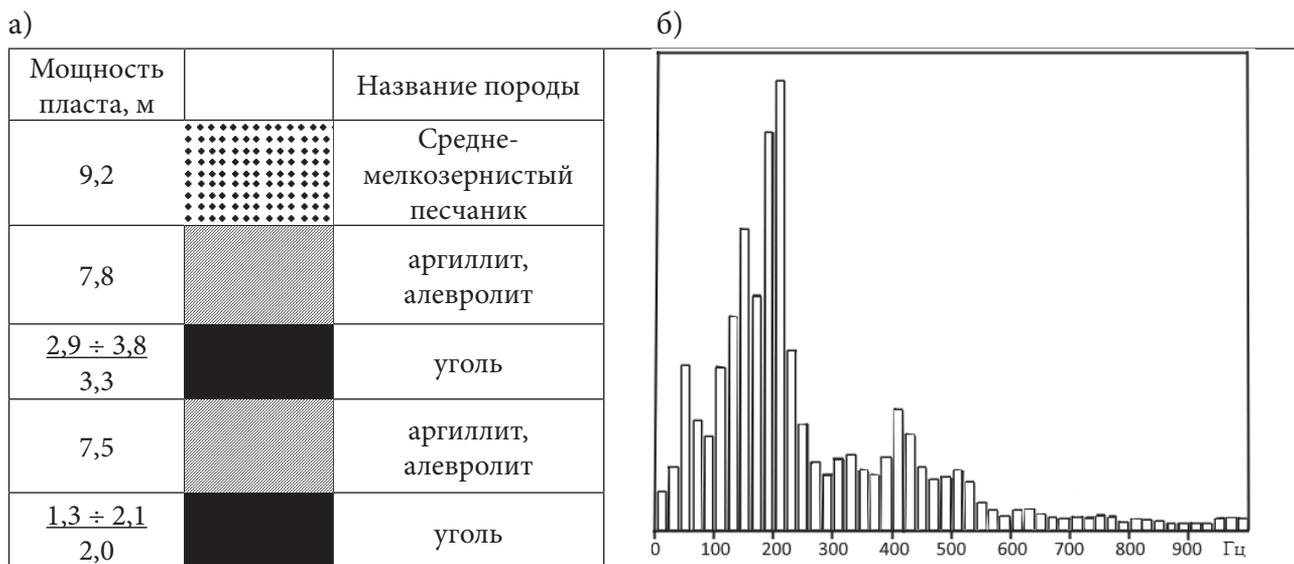


Рис. 3. Геологическая колонка (а) и линейный спектр ИАС в подготовительной выработке (б)

Таблица 1

Источник возникновения резонанса в породах кровли рабочего угольного пласта мощностью 3,3 м

Резонансные частоты, Гц	Расстояние контакта от пласта, м	Источник возникновения резонанса в кровле угольного пласта
60 *	около 42	Контакт за пределами представленной информации
160 *	15,6–14,9	Кровля слоя песчаника
220 *	11,4	Межслоевые деформации в средней части слоя прогибающегося песчаника мощностью 9 м ($7,8 + 4,5 = 12,3$)
320 *	7,8	Почва слоя песчаника
420 *	6,0	Верхняя граница канатных анкеров
520–640	4,8–3,9	Межслоевые деформации в средней части слоя прогибающейся толщи мощностью 7,8 м
940	2,7	Верхняя граница действия анкеров длиной около 2,8 м крепления выработки

* — резонансы с максимальной амплитудой на различных участках выработки.

При возбуждении сигнала для решения задач в шахтных условиях с конкретной технологией проведения выработок амплитуда резонансной частоты и регистрируемый диапазон генерации резонансных колебаний может зависеть не только от свойств слоистого массива, но и от возбуждаемого импульса. Математически возбуждаемый импульс описывается δ -функцией, ее спектр представляет горизонтальную линию вдоль оси частот на уровне амплитуды импульса. Физически спектр

возбуждаемого импульса зависит от длительности воздействия τ на массив: чем длительнее воздействие, тем ниже граница резонанса на оси возбуждаемых частот. Длительность воздействия τ , например, при возбуждении сигнала в подготовительной выработке ударным способом может зависеть от состояния ее бортов. Поскольку степень разрушения бортов может существенно отличаться, изменение длительности воздействия повлечет изменение амплитуды резонансных частот.

На рис. 4 приведены спектры ИАС при возбуждении сигналов металлическим молотком путем нанесения ударов по установленному в массиве металлическому анкеру и непосредственно по угольному пласту. В табл. 2 представлены численные значения резонансных частот, относительные амплитуды резонансной частоты (относительное ослабление ОМК) и соответствующие им расстояния до ОМК. Все резонансные частоты до 800 Гц находят отражения на спектрах ИАС независимо от места нанесения ударов, однако имеются существенные изменения в относительном ослаблении (в амплитудах резонансных частот), которые увеличиваются для частот более 500 Гц. Поскольку установленные анкера в меньшей степени зависят от состояния угля в борту выработки, приведенные данные позволяют сделать вывод, что для более стабильной длительности воздействия

удары следует наносить по выступающей части анкеров крепления выработки или применять такое возбуждение сигнала в качестве эталонного в сравнении с нанесением удара по борту выработки или иным местам.

Распределение ОМК и их расстояния до контактов являются объективными, не зависят от технологии выполнения зондирований, в меньшей мере независимость от технологии проявляет спектральный максимум F_0 , который соответствует расстоянию до максимальных ослаблений контакта в углевмещающих породах. Коэффициент K определяется таким образом, что на безаномальных по напряжению (и горно-геологическим условиям) участках его значение равно 1,0, этот участок служит эталоном, и значения коэффициента фиксируют повышение напряжений или локальную разгрузку на участках текущих наблюдений по сравнению с эталонным участком. Численные

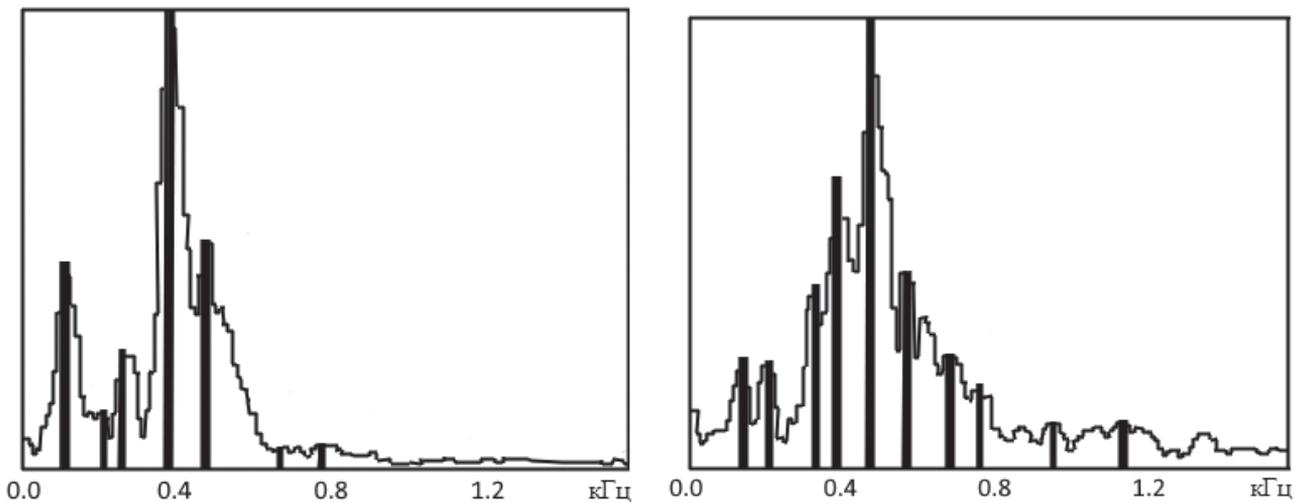


Рис. 4. Спектры акустических сигналов с выделенными резонансными частотами в конвейерном штреке 1850 при возбуждении ударами металлическим молотком по угольному пласту (а) и по металлическому анкеру (б)

Таблица 2

Сопоставление параметров ИАС при нанесении ударов по угольному пласту и анкеру в конвейерном штреке 1850 шахты «Комсомолец» АО «СУЭК-Кузбасс»

Место удара	Частота резонанса, Гц – относительные ослабление ОМК, %, расстояние от пласта, м									
Пласт	100-46/25	200-14/12,5	280-24/8,6	400-100/6,2	480-52/5,2	560-16/4,5	680-6/3,8	800-3/3,1		
Анкер	120-24/20,8	200-24/12,5	320-40/7,8	400-64/6,2	480-100/5,2	580-44/4,5	700-26/3,6	780-16/3,2	980-10/2,6	1140-10/2,2

значения суммарной энергии E выражаются в условных единицах и в определенной степени зависят от технологических приемов получения информации. Поэтому для качественного анализа параметров K и E важное значение приобретает идентичность технологии получения информации на всех пунктах наблюдений. В этой связи при выполнении акустических зондирований предпочтительным является возбуждение ИАС путем нанесения ударов по анкеру.

Динамика параметров ИАС в месте их возбуждения исследована на различных аномальных горно-геологических объектах — зоны ПГД, геологических нарушений, сбойки с горными выработками и передовые выработки в очистных забоях. В качестве примера на рис. 5 показано поведение коэффициента относительных напряжений K в подготовительной выработке, где на пикете 20 выполнено бурение разгрузочных скважин, что привело к перераспределению относительных напряжений и межслоевых деформаций в призабойной части. На пикете 25 м после бурения скважин усиливаются относительные напряжения за счет контактов с максимальным ослаблением (деформациями) вблизи угольного пласта, затем следует относительная разгрузка призабойного массива со смещением контактов с максимальным ослаблением на расстояние до около 60 м от угольного пласта (пикет 55 м).

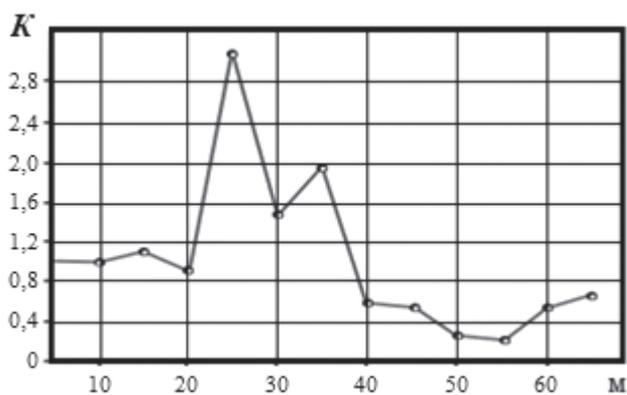


Рис. 5. Изменения значений коэффициента относительных напряжений K на участке подвигания забоя подготовительной выработки после бурения разгрузочных скважин в районе пикета 20 м

Свойства массива отражены в спектрах ИАС, пример которых для двух участков бурения разгрузочных скважин (пикет 20 и 80) приведен на рис. 6. Для положения забоя перед началом бурения скважин (рис. 6 а, б), в максимуме относительных напряжений (рис. 6 в, г) и в районе относительной разгрузки (рис. 6 д, е). В табл. 3 приведены значения коэффициентов относительных напряжений K , частоты всех выделенных резонансов F , их относительные амплитуды (относительно амплитуды спектрального максимума), характеризующие степень относительных ослаблений контактов (развития межслоевых деформаций), и расстояния до ОМК.

Анализ этих данных показывает сравнительно устойчивое положение в разрезе пород кровли ослабленных контактов (частоты резонансов) до и после воздействия разгрузочных скважин, а изменение напряжений происходит за счет перераспределения интенсивности ослабления контактов, что выражается в изменении амплитуд резонансных частот. Перераспределение амплитуд резонансных частот приводит к изменению соотношения высокочастотной A_v и низкочастотной A_n составляющих и значения коэффициента K , что подтверждает его связь с напряженным состоянием массива горных пород.

Установленные закономерности изменения параметров ИАС применены для изучения слоистого массива горных пород в их естественном залегании и при разработке полезных ископаемых методом акустических зондирований, основанных на импульсном (ударном) возбуждении ИАС [11]. Развитие аппаратно-программного обеспечения и расширение области применения выполнены сотрудниками Межотраслевой научно-технической лабораторией разработки, изготовления и внедрения автоматизированных систем (МНТЛ РИВАС) (г. Москва) [12]. Акустические зондирования выполняются при помощи регистратора искробезопасного портативного акустических сигналов (РИПАС), в качестве приемника колебаний служит

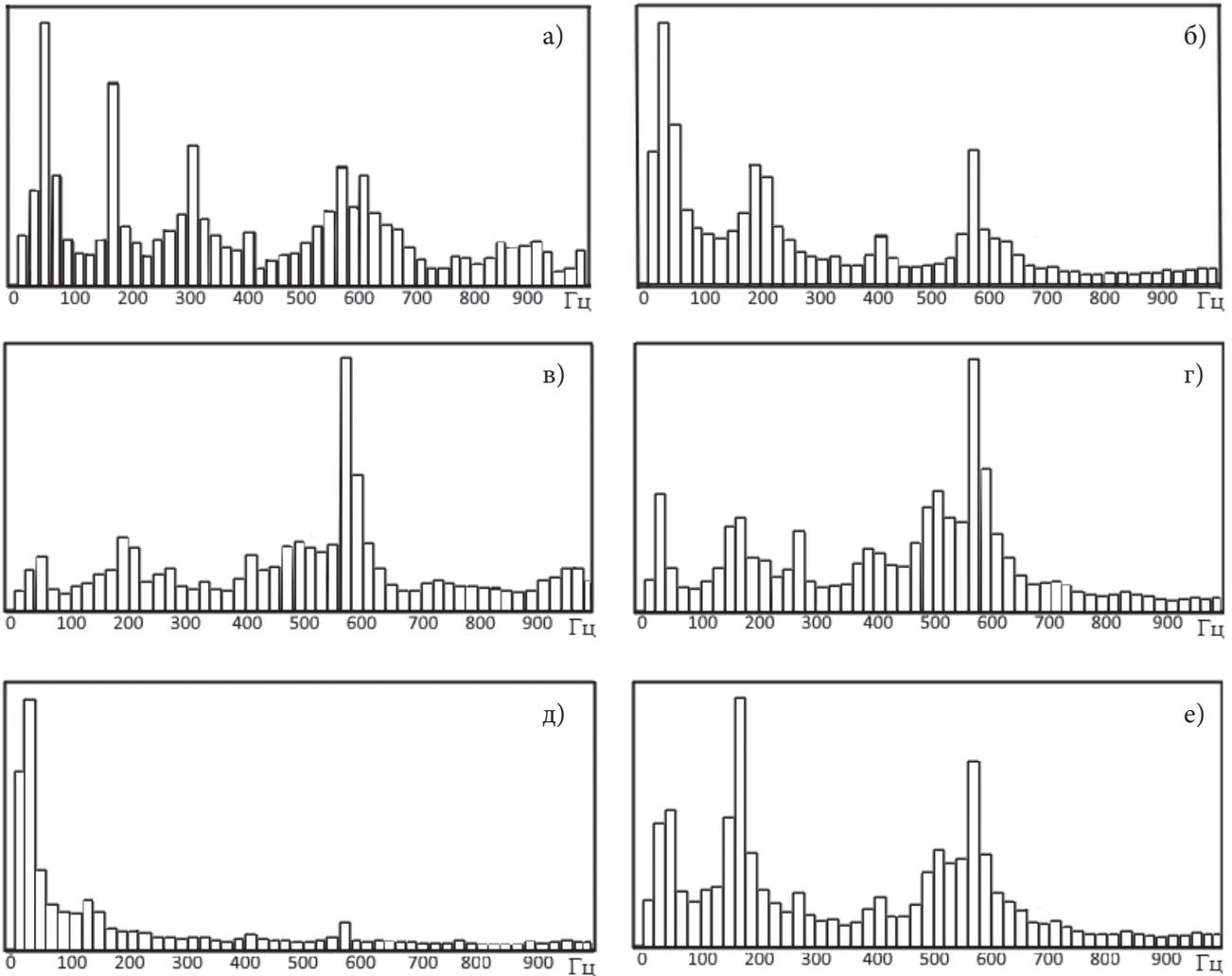


Рис. 6. Линейные спектры ИАС в подготовительном забое перед бурением разгрузочных скважин (а, б), в максимуме относительных напряжений (в, г) и на участке относительной разгрузки (д, е) на пикете 20 (а,в,д) и пикете 80 (б,г,е)

Таблица 3

Значения коэффициентов относительных напряжений K , частоты резонансов F , их относительные амплитуды и расстояния от угольного пласта до контакта с ослаблением, м

Пикет	K	Частота резонансов, Гц, — контакт с относительным ослаблением / расстояние до контакта с ослаблением, м						
		40–60	140–200	240–280	320–340	420	580	780–960
20	1,0	60–1,0/42	180–0,8/13,9	260–0,54/9,6		420–0,2/6,0	580–0,46/4,3	920–0,16/2,7
25	2,95	60–0,2/42	200–0,3/12,5	260–0,16/9,6	340–0,12/7,4	420–0,24/6,0	580–1,0/4,3	960–0,22/2,6
55	0,13	40–1,0/42	140–0,18/17,9	240–0,05/10,4	340–0,03/7,4	420–0,06/6,0	580–0,13/4,3	960–0,02/2,6
80	0,32	40–1,0/62	200–0,46/12,5		340–0,14/7,4	420–0,20/6,0	580–0,52/4,3	920–0,15/2,7
85	1,05	40–0,46/62	200–0,36/12,5	280–0,32/8,9		420–0,24/6,0	580–1,0/4,3	940–0,08/2,7
120	0,47	60–0,53/42	160–1,0/15,6	280–0,20/8,9		420–0,19/6,0	580–0,75/4,3	940–0,02/2,7

геофон с пьезоэлементом, для ударного возбуждения применяется слесарный молоток, обработка записей ИАС осуществляется на поверхности по программе «Геоскан-РИВАС». Частотный диапазон регистрации ИАС от 20 до 5000 Гц позволяет определять положения ОМК в интервале расстояний 125–0,5 м от горной выработки. Пункты наблюдений в горных выработках располагаются без ограничений типа выработок и горно-геологических условий с заданным промежутком между наблюдениями.

Методика акустических зондирований в горной выработке включает установку геофона, преобразующего упругие колебания в электрический (акустический) сигнал, и ударное возбуждение сигнала на расстоянии около 2–3 м слева и справа от места установки геофона. По результатам обработки спектров ИАС акустических зондирований вычисляются: распределение ОМК по разрезу углевмещающих пород с оценкой интенсивности ослабления контактов; коэффициент относительных напряжений K , доли единицы; расстояние до контакта с максимальным ослаблением $h_{Аmax}$, м, которое соответствует частоте спектрального максимума F , Гц;

суммарную энергию сигнала E , у.е., и некоторые другие параметры.

Раздельное представление результатов обработки сигнала при нанесении ударов слева и справа на одном пункте размещения геофона позволяет более детально исследовать динамику напряжений по горной выработке. Расстояние между нанесением ударов 3–5 м. На рис. 7 приведено сопоставление распределения коэффициента K , определяемом при нанесении ударов с разных сторон геофона (рис. 9-1), и среднем значении в районе крепления геофона с (рис. 9-2). Расхождение между двумя возбуждениями сигнала демонстрируют формирование резонанса ИАС по нормали к плоскости нанесения ударов, что имеет принципиальное теоретическое значение.

Фиксация значений параметров ИАС с двух сторон от крепления геофона обеспечивает высокую разрешающую способность метода.

Как указывалось выше, параметры ИАС имеют связь с состоянием массива горных пород. На рис. 8 представлены результаты акустических зондирований в конвейерной печи в движущемся очистном забое лавы 24-63

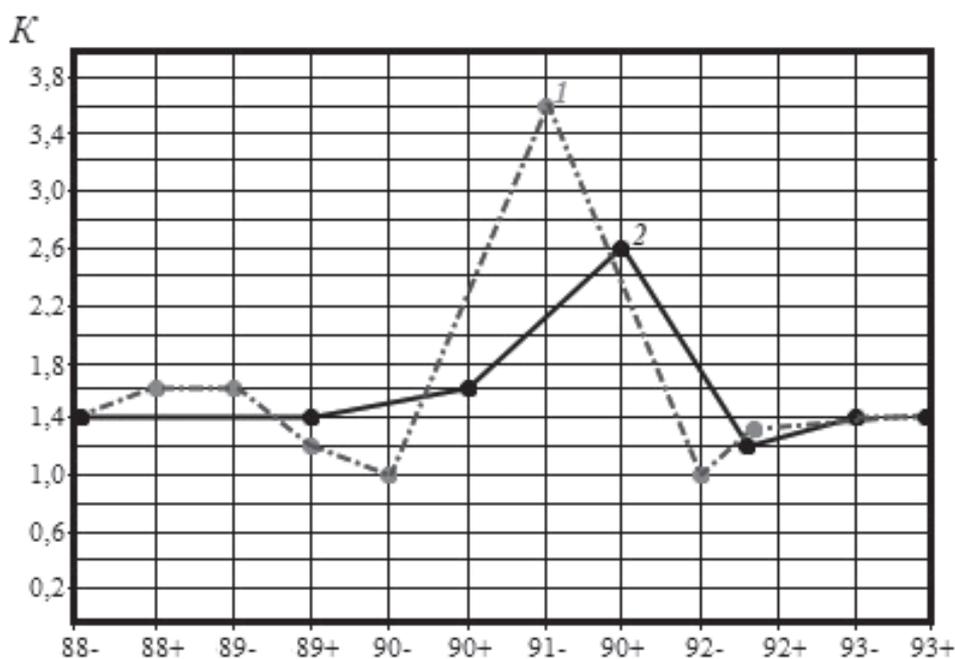


Рис. 7. Динамика коэффициента относительных напряжений K по пунктам наблюдений (ПК) с раздельным представлением результатов при возбуждении сигнала слева и справа от геофона (2) и по средним значениям в районе крепления геофона (1)

шахты им. С. М. Кирова. На рис. 8а приведены распределения ОМК в породах кровли от забоя вдоль конвейерной печи 24-63 на протяжении 47 м, на котором расстояния до ОМК определены по формуле (1), на оси Y они обозначены горизонтальной линией, длина которой отражает относительное ослабление контакта (относительную интенсивность развития деформаций) в пункте наблюдений. По положению ОМК и интенсивности их ослабления видно, что на протяжении 17 м от забоя развитие межслоевых деформаций сосредоточено на расстоянии до 7 м от угольного пласта, по мере удаления от забоя увеличивается объем массива, охваченный достаточно интенсивными межслоевыми деформациями в его кровле, достигая расстояния 25 м от пласта.

На рис. 8б в виде графика указаны расстояния от угольного пласта до контактов с максимальным ослаблением, соответствующие частоте спектрального максимума F . Расстояние до контактов с максимальной интенсивностью развития межслоевых деформаций на расстоянии 23 м от забоя в средней части интервала наблюдений достигает 25 м.

На рис. 8в представлен коэффициент относительных напряжений K , отражающий динамику напряжений в призабойной части массива впереди движущегося забоя. Низкие значения ($K = 1,07$) наблюдаются непосредственно вблизи очистного забоя и обусловлены разрушением пласта. Максимум напряжений ($K = 1,88$) в 7 м от забоя, в его защемлении толщей вмещающих пород. Относительная разгрузка на расстоянии 23 м от забоя ($K = 0,96$)

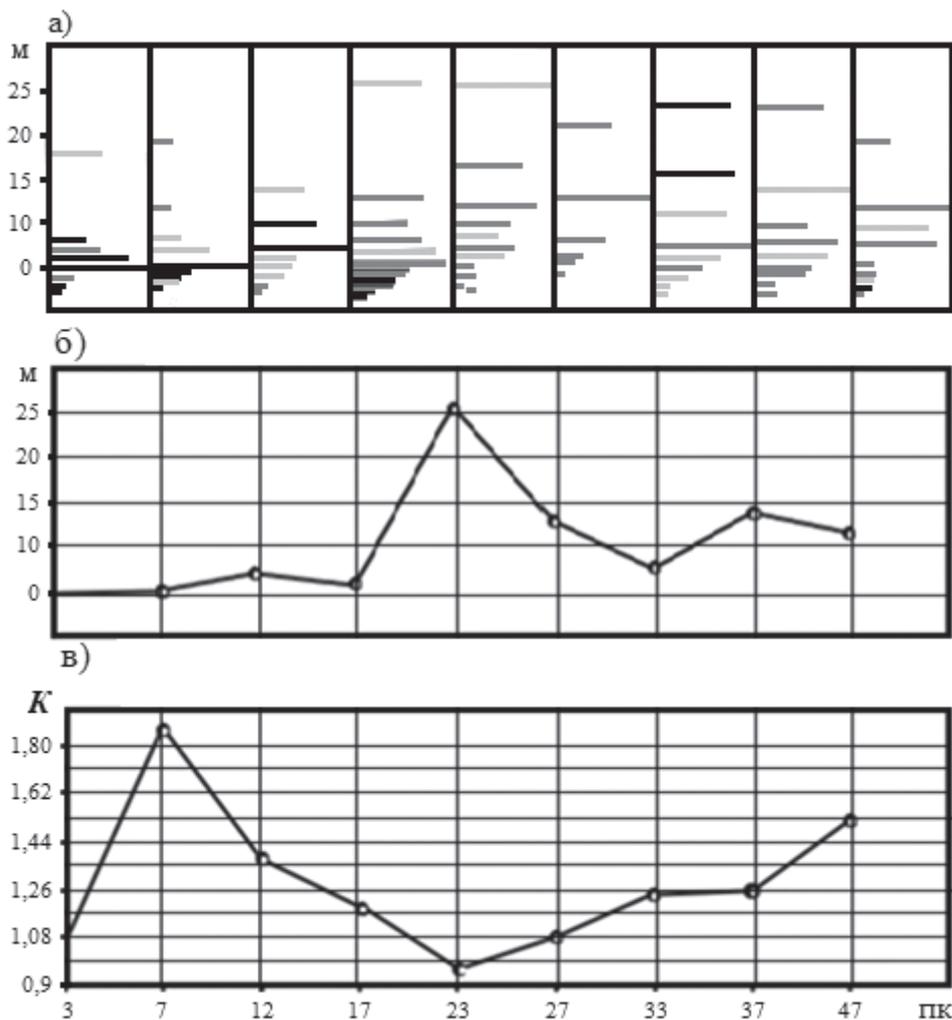


Рис. 8. Результат акустических зондирований от очистного забоя, в конвейерной печи 24-63 шахты им. С. М. Кирова: распределение ОМК в кровле угольного пласта (а), расстояния от угольного пласта до контактов с максимальным ослаблением (б) и коэффициент относительных напряжений K (в).

в средней части интервала наблюдений, где максимальные ослабления контактов перемещены на 25 м от пласта. По мере удаления от забоя наблюдается рост значений K , достигая значения 1,52 на расстоянии 47 м от очистного забоя.

Объективная информация отражена на рис. 8а, но на фоне распределения всех ОМК явно видно только положение контакта с максимальным ослаблением и не видна динамика относительных напряжений K и других параметров ИАС.

Для оценки распространения относительных напряжений в массиве горных пород выполнялись акустические зондирования по двум параллельным выработкам. Анализировались спектры ИАС и распределение значений коэффициента K в остановленном забое одной выработки и в более протяженной параллельной выработке. В качестве примера на рис. 9 изображены результаты акустических зондирований в газодренажном штреке 25-04 (а) и в проведенном спустя около 2 недель на расстоянии 40 м от него параллельном путевом штреке 25-04 (б) по угольному пласту Поленовский шахты «им. С. М. Кирова».

Зондирования выполнялись по газодренажному штреку, спустя некоторое время после его остановки, от сбойки до места его остановки на 58 м, а по второй — от сбойки до 61 м.

Повышенные значения коэффициента K на пикете 21 (рис. 9) соизмеримы по интенсивности и обусловлены влиянием сбойки. Максимальные значения коэффициента $K = 2,5$ на пикете 43 в газодренажном штреке обусловлены влиянием остановленного забоя. В путевом штреке, несмотря на расстояние 40 м от газодренажного штрека, зафиксировано совпадение распределения параметра K при достижении максимума 1,85 на пикете 41, что на 30,5 % меньше относительно максимума в дренажном штреке.

Эти данные показывают возможную дальность горизонтального распространения относительных напряжений в массиве по напластованию горных пород на расстояние не менее 40 м, что необходимо учитывать при проведении параллельных выработок.

Для оценки состояния массива горных пород в горной выработке наиболее распространены коэффициент относительных

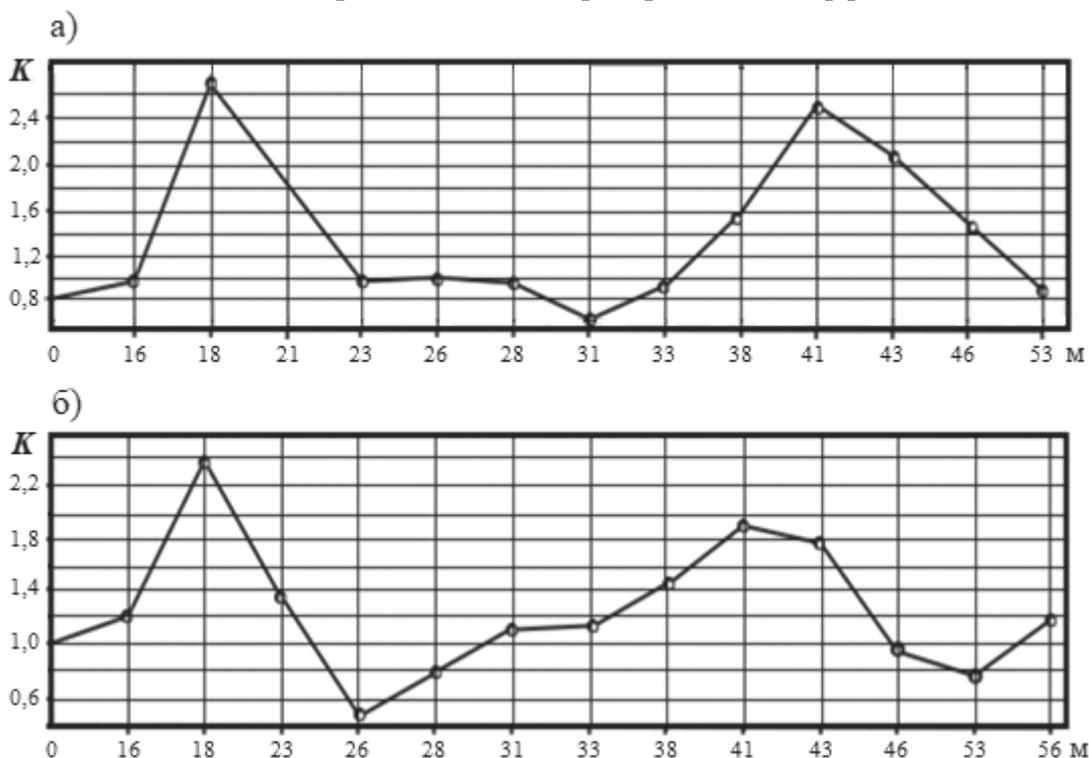


Рис. 9. Коэффициент относительных напряжений K по данным акустических зондирований в газодренажном штреке 25-04 (а) и в путевом штреке 25-04 (б) шахты «им. С. М. Кирова»

напряжений K и частота спектрального максимума F (расстояние до контакта с максимальным ослаблением), но при решении определенных задач привлекается и суммарная энергия резонансных частот E .

На рисунке 10 отображены результаты акустических зондирований на участке пересечения сбойки в конвейерном штреке 1848, — коэффициент относительных напряжений K и суммарная энергия резонансных частот E , оба параметра на графике представлены в относительных единицах и нормированы по их максимуму. В районе сбойки (около 0 м) относительная разгрузка массива — увеличение значений E до 0,85 и уменьшение K до 0,12. При отходе от сопряжения (10–15 м) уменьшение значений E до 0,22 и увеличение напряжений до 0,23, за которыми следуют экстремумы параметров. Следовательно, суммарная энергия резонансных частот, в определенной степени, отражает относительную разгрузку массива горных пород.

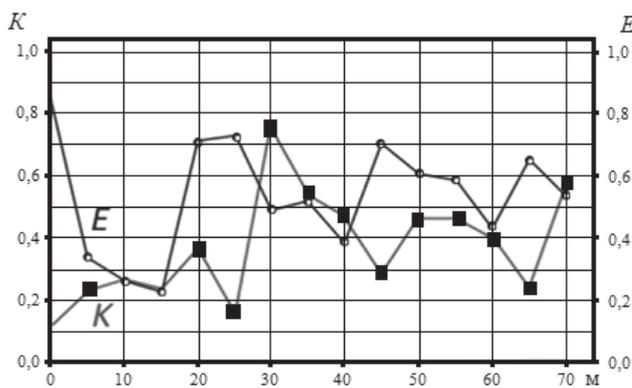


Рис. 10. Коэффициент относительных напряжений K , и суммарная энергия резонансных частот E по данным акустических зондирований в конвейерном штреке 1848 ш. «Комсомолец» на участке пересечения и отхода от сбойки

Параметры ИАС при акустическом зондировании применяются для решения ряда задач, среди которых определение расстояний от полевой горной выработки до угольного пласта, контроль положения максимальных расслоений пород в кровле выработки, прогноз прорывов метана из надрабатываемого газоносного пласта, оценка опасности динамических явлений при ведении горных работ или в поддерживаемой выработке. Обработка

записей акустических сигналов выполняется на поверхности по программе, которая в автоматизированном режиме выделяет полезные импульсы, вычисляет суммарный спектр для каждого пункта наблюдений и определяет по нему необходимые параметры для решения перечисленных задач.

Непрерывное воздействие горного оборудования на слоистый массив при проведении горных выработок или при выемке угля в очистном забое также служит источником резонансных колебаний ИАС, параметры которых обладают описанными выше свойствами. На анализе параметров таких ИАС МНТЛ-РИВАС разработан программно-аппаратный комплекс — система акустического контроля массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ), которая соответствует нормативным требованиям [13, 14]. Комплекс обеспечивает регистрацию ИАС в забое горных выработок, передачу их на поверхность, обработку и анализ данных в автоматизированном режиме, что исключает влияние субъективного фактора на результат анализа. Программно-аппаратный комплекс САКСМ прогнозирует все виды ДЯ [15], геологические нарушения впереди забоя и контролирует динамику напряженно-деформированного состояния призабойного массива.

Как показало промышленное применение, САКСМ по прогностическим параметрам и их пороговым значениям обеспечивает выделение впереди движущегося забоя участка категории «опасно» с ошибкой его пропуска не превышающей 10^{-7} . Такая точность достигнута за счет применения четырех прогностических параметров и их пороговых значений, которые автоматически контролируются по мере движения забоя. Прогностические параметры формируются по среднему спектру, полученному в режиме накопления при работе горного оборудования в определенный промежуток времени, — два амплитудных — низкочастотная (A_n) и высокочастотная (A_b) составляющие спектра, полученные по описанной выше схеме, и два частотных — нижние границы спектра на уровне 0,5 ($f_{0,5}$)

и 0,75 ($f_{0.75}$) максимальной амплитуды спектра. Их пороговые значения определяются по выборке объемом 150 значений на эталонных безаномальных участках выработки. Обработка ИАС и принятие решений выполняются автоматически, что исключает влияние субъективного фактора.

Прогноз геологических нарушений впереди движущегося забоя выполняется по параметру P_g , разработанному с использованием коэффициента относительных напряжений K и частоты спектрального максимума F .

Для прогноза прорывов метана из надрбатываемого пласта-спутника, расположенного на глубине до 25 м, разработан коэффициент K_m с использованием резонансных частот спектра.

Для контроля состояния напряженно-деформированного состояния призабойного массива применяются описанные выше параметры ИАС: частота спектрального максимума F , коэффициент относительных напряжений K , и определенная при выполнении БПФ энергия спектра резонансных частот E .

ВЫВОДЫ.

1. Одним из преимуществ применения искусственных акустических сигналов

служит получение информации о состоянии массива горных пород в пункте возбуждения.

2. Основным результатом обработки спектров ИАС — вычисление распределения ослабленных контактов во вмещающих горную выработку породах с оценкой их относительных ослаблений.

3. По спектру ИАС определяются коэффициент относительных напряжений K , при проведении зондирований суммарная энергия E вычисляется по сумме энергий резонансных частот, а при применении САКСМ суммарная энергия резонансных частот E получается по результатам БПФ. Эти параметры применяются для оценки состояния массива в пункте наблюдений по сравнению с эталонным участком.

4. Применение импульсного автономного возбуждения ИАС служит основой для акустических зондирований состояния массива эксплуатируемых горных выработок в пунктах наблюдений. Непрерывное возбуждение ИАС воздействием на забой горного оборудования служит основой для автоматизированной системы акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов М. С., Анциферова Н. Г., Коган Я. Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. М.: Наука. 1971. 134 с.
2. Яковлев Д. В., Мулев С. Н., Яковлев В. А. и др. Система сейсмического мониторинга GITS // Сборник научных трудов ВНИМИ. 2012. С. 18–25.
3. Глушко В. Т., Ямщиков В. С., Яланский А. А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. М.: Недра, 1987. 280 с.
4. А.С. № 1222853 СССР МПК E21F 5/00, E21C 39/00 Способ акустического прогноза выбросоопасности угольных пластов и устройство для его осуществления / Мирер С. В., Масленников Е. В., Хмара О. И..1981.
5. Мирер С. В., Хмара О. И., Масленников Е. В. О контроле выбросоопасности забоев по спектральным характеристикам акустических сигналов // Вопросы предотвращения внезапных выбросов. 1987. С. 52–61.
6. Мирер С. В., Хмара О. И., Шадрин А. В. Спектрально-акустический прогноз выбросоопасности угольных пластов. Москва — Кемерово: Кузбассвузиздат, 1999. 92 с.
7. Гликман А. Г. Поля упругих колебаний в горных породах. Л., 1984. 63 с.
8. Андреев В. П., Гликман А. Г. Геоакустический метод выявления поверхностей ослабленного механического контакта // Уголь. 1985. № 9.

9. Гликман А. Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки // www.newgeophys.spb.ru/ru/book/index.shtml, 2002. 104 с.
10. Брюханов А. М. и др. Акустический контроль выбросоопасности // Исследование и предотвращение аварий на угольных шахтах. Том 3. Донецк: Вебер, 2007. 692 с.
11. Лунев С. Г., Колчин Г. И. Оценка состояния массива по результатам импульсного возбуждения // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. Сб. науч. тр. Макеевка: МакНИИ. 2001. Ч. 1. С. 101–108.
12. Копылов К. Н., Смирнов О. В., Кулик А. И., Пальцев А. И. Автоматизированная система контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений // Безопасность труда в промышленности. № 8. 2015.
13. Смирнов О. В., Кулик А. И. (СУЭК), Шилов В. И., Горбачев А. С. Автоматизированный прогноз динамических явлений // Добывающая промышленность. 2016. Вып. 2. С. 56–63.
14. Костеренко В. Н., Смирнов Р. О., Аксенов З. В. Динамика газовыделений в очистных забоях // Горная промышленность. 2019. № 2. С. 52–56.
15. Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений. ФНИП утверждены Ростехнадзором 10.12.2020 г.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.34.10.002

UDC 622.831.322

© A. S. Gorbachev, V. I. Shilov, D. A. Shilov, 2025

A. S. GORBACHEV

Leading Engineer

LLC MNТL «RIVAS», Moscow

e-mail: info@rivas.ru

V. I. SHILOV

Director of Science

LLC MNТL «RIVAS», Moscow

e-mail: 30shilov@gmail.com

D. A. SHILOV

Service Engineer

LLC «RIVAS-Kuzbass», Novokuznetsk,

e-mail: Shilovdarivas@gmail.com

PARAMETERS OF ARTIFICIAL ACOUSTIC SIGNAL IN LAYERED MASSIF

This article presents research findings on the parameters of artificial acoustic signals generated within a layered rock mass in coal mines. These parameters characterize the stress-strain condition of the massif and are derived from the signal's spectrum. They include the distribution of weakened contacts resulting from interlayer deformation, the coefficient of relative stresses, the energy of specific resonances and the overall signal, the frequency of the spectral peak, and the location of maximum delamination within the massif. The study also outlines methodological approaches for using artificial acoustic signals in addressing geological challenges, such as predicting dynamic events and monitoring the massif.

Key words: ARTIFICIAL ACOUSTIC SIGNAL, SIGNAL SPECTRUM, COEFFICIENT OF RELATIVE STRESSES, ACOUSTIC SOUNDING.

REFERENCES

1. Antsiferov M. S., Antsiferova N. G., Kagan Ya. Ya. Seismoacoustic research and the problem of forecasting dynamic phenomena. Moscow: Nauka. 1971. 134 p. [In Russ.].
2. Yakovlev D. V., Mulev S. N., Yakovlev V. A. and others. The GITS seismic monitoring system // Collection of scientific papers VNIMI. 2012. P. 18–25. [In Russ.].
3. Glushko V. T., Yamshchikov V. S., Yalansky A. A. Geophysical control in mines and tunnels. Moscow: Nedra, 1987. 280 p. [In Russ.].
4. Copyright certificate No. 1222853 of the USSR IPC E21F 5/00, E21C 39/00 Method of acoustic prediction of coal seam emissions and a device for its implementation / Mirer S. V., Maslennikov E. V., Khmara O. I. 1981. [In Russ.].
5. Mirer S. V., Khmara O. I., Maslennikov E. V. On the control of the emission hazard of stopes based on the spectral characteristics of acoustic signals // Issues of preventing sudden emissions. 1987. P. 52–61. [In Russ.].
6. Mirer S. V., Khmara O. I., Shadrin A. V. Spectral and acoustic prediction of coal seam emissions. Moscow – Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 1999. 92 p. [In Russ.].
7. Glikman A. G. Fields of elastic vibrations in rocks. L., 1984. 63 p. [In Russ.].
8. Andreev V. P., Glikman A. G. Geoacoustic method for detecting surfaces of weakened mechanical contact. 1985. No. 9. [In Russ.].
9. Glikman A. G. Physics and practice of spectral seismic exploration // www.newgeophys.spb.ru/ru/book/index.shtml. 2002. 104 p. [In Russ.].
10. Bryukhanov A. M. and others. Acoustic emission control // Investigation and prevention of accidents in coal mines. Vol. 3. Donetsk: Weber, 2007. 692 p. [In Russ.].
11. Lunev S. G., Kolchin G. I. Evaluation of the array state based on the results of pulsed excitation // Ways and means of creating safe and healthy working conditions in coal mines. Collection of scientific tr. Makeyevka: MakNII. 2001. Part 1. P. 101–108. [In Russ.].
12. Kopylov K. N., Smirnov O. V., Kulik A. I., Fingers A. I. An automated system for monitoring the condition of a rock mass and forecasting dynamic phenomena // Occupational safety in industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. No. 8. 2015. [In Russ.].
13. Smirnov O. V., Kulik A. I. (SUEK), Shilov V. I., Gorbachev A. S. Automated prediction of dynamic phenomena // Extractive industry [Dobывayushchaya promyshlennost]. 2016. Iss. 2. P. 56–63. [In Russ.].
14. Kosterenko V. N., Smirnov R. O., Aksenov Z. V. Dynamics of gas emissions in production faces // Mining Industry [Gornaya promyshlennost]. 2019. No. 2. P. 52–56. [In Russ.].
15. Instructions for forecasting dynamic phenomena and monitoring rock formations during mining of coal deposits. The FNIP was approved by Rostekhnadzor on 10.12.2020. [In Russ.].