

МОНИТОРИНГОВЫЕ СИСТЕМЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.831.325

ПОСАДКА КРОВЛИ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИСКУССТВЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В. И. Шилов¹, З. В. Аксенов²

¹ООО “МНТЛ РИВАС”,

E-mail: info@rivas.ru, ул. Каскадная, 20, корп. 2, 111625, г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”,

E-mail: aksekov.zakhar@yandex.ru, Ленинский проспект, 4, 119049, г. Москва, Россия

Определены параметры искусственного акустического сигнала при мониторинге массива горных пород для прогноза участков посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт. Установлены пороговые значения параметров для построения алгоритма автоматизированного решения задачи. Продемонстрирована динамика информативных параметров искусственного акустического сигнала на участках посадки основной кровли в очистных забоях угольных шахт “Им. В. Д. Ялевского”, “Им. С. М. Кирова” и “Комсомолец”. Проведены исследования по оценке стабильности параметра суммарной энергии резонансных частот на различных расстояниях от монтажной камеры по длине выемочного столба в трех лавах угольных шахт АО “СУЭК-Кузбасс” для установления взаимосвязи относительных напряжений и интенсивности развития межслоевых деформаций. Предложен и испытан прогностический параметр, позволяющий определять момент посадки основной кровли с оценкой динамичности данного процесса.

Искусственный акустический сигнал, посадка основной кровли, безопасность ведения горных работ, система акустического контроля состояния массива, динамика относительных напряжений

DOI: 10.15372/FTPRPI20220414

Ведение горных работ в очистном забое связано с различными негативными проявлениями горного давления при посадке пород основной кровли. Изменение напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород в этом процессе может обуславливать возникновение внезапных обрушений пород, загазирование горных выработок, повышение опасности эндогенных пожаров при определенных условиях. Вероятность перечисленных негативных проявлений горного давления подтверждает важность прогнозирования посадки пород основной кровли при ведении очистных работ, актуальность принятия предупредительных мер во избежание аварий и инцидентов [1–3].

Широко распространен расчетный способ определения момента посадки основной кровли. Однако одним из его недостатков является отсутствие информации о реальных параметрах массива при движении очистного забоя, а также критерия оценки степени опасности данного процесса [4]. Посадка основной кровли сопровождается изменением напряженно-деформированного со-

стояния массива, что указывает на возможность применения геофизических методов для прогноза данного явления [5–7]. Наиболее перспективные методы контроля напряженно-деформированного состояния массива горных пород основаны на применении автоматизированных систем. Большинство из них предусматривает регистрацию акустической эмиссии пород, при которой для определения положения акустических событий требуется система локации [8, 9].

Система сейсмического контроля горного массива основана на непрерывном автоматическом режиме фиксации волнового поля при силовом воздействии на забой. В процессе функционирования режима тишины регистрируется с накоплением векторное поле активной сейсмоакустической эмиссии [10]. Среди зарубежных выделяются аппаратно-программные комплексы True Reflection Tomography, RockVision 3D, Tunnel Seismic Tomography и др. [11–13].

Система акустического контроля состояния массива горных пород и прогноза динамических явлений (САКСМ) использует параметры искусственных акустических сигналов (ИАС), возникающих в призабойной части массива при воздействии на него горного оборудования [14–17].

Методика получения информативных параметров о состоянии массива горных пород при использовании САКСМ сводится к реализации следующих этапов. Геофон устанавливается на элементах механизированной крепи не ближе 10 м от сопряжения очистного забоя с оконтуривающими выработками. Максимальное расстояние до сопряжения зависит от длины очистного забоя, но, как правило, не превышает 40 м, при этом в обязательном порядке соблюдается идентичность и качество крепления геофона на всем протяжении работы лавы, что позволяет обеспечить однообразие условий получения информации (рис. 1).

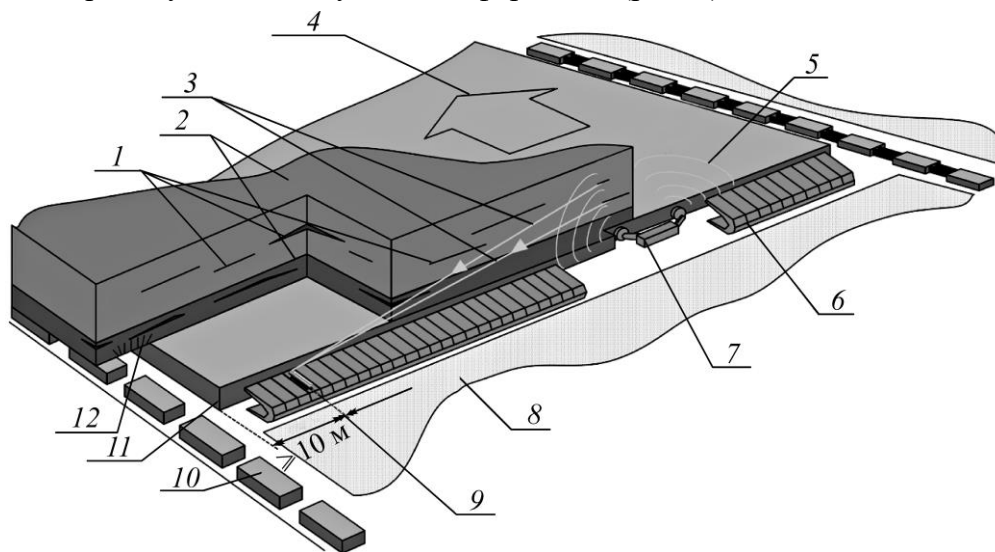


Рис. 1. Принципиальная схема работы САКСМ в очистном забое: 1 — ослабленные межслоевые контакты; 2 — вмещающие породы; 3 — резонансные (упругие) колебания; 4 — направление движения очистного забоя; 5 — импульсное воздействие комбайна; 6 — секции механической крепи; 7 — очистной комбайн; 8 — выработанное пространство; 9 — регистрирующий геофон; 10 — целик; 11 — сопряжение; 12 — анкерная крепь

Геофон представляет собой цилиндр диаметром 40 мм и длиной 300 мм, включающий пьезоэлектрический преобразователь упругих колебаний в электрический сигнал. Также в комплекс программно-аппаратного обеспечения САКСМ ООО «МНТЛ «РИВАС» входят усилитель акустического сигнала, преобразователь для его передачи на поверхность и программное обеспечение акустического контроля состояния массива горных пород АКМП РИВАС. Частотный диапазон аппаратуры составляет 20–5 000 Гц, дальность передачи сигнала — до 10 км.

Обработка акустических сигналов выполняется непрерывно на протяжении работы комбайна при выемке угля, их параметры определяются по спектру, усредненному во временных интервалах. Программное обеспечение позволяет контролировать качество ИАС, сохранять данные в течение 72 ч, выполнять просмотр результатов обработки в текущем режиме и ретроспективный анализ параметров за предыдущие подвигания забоя.

Перспективность использования ИАС для решения горно-геологических задач обусловлена следующими свойствами: в каждом слое, разделенном ослабленными межслоевыми контактами (ОМК), возникают собственные (резонансные) колебания. Частота собственных колебаний f_p — обратно пропорциональна мощности слоя горных пород, амплитуда резонансной частоты, как правило, зависит от степени ослабления горных пород в приповерхностной зоне контакта [18, 19]. Углевмещающий массив обычно состоит из нескольких породных слоев, разделенных ОМК. Возбуждаемый в нем акустический сигнал после быстрого преобразования Фурье представлен спектром из суперпозиции резонансных частот, характеризующихся возникновением собственных колебаний в каждом из слоев пород (рис. 2).

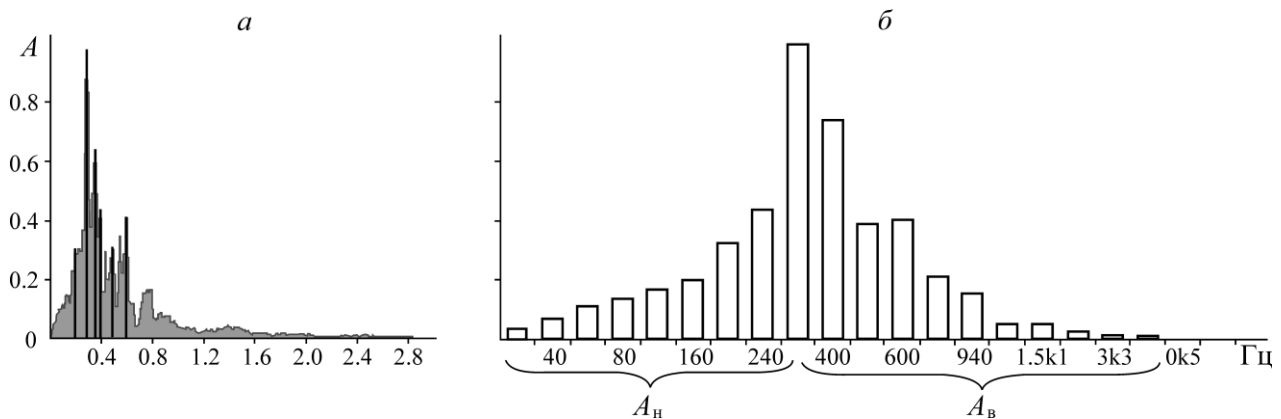


Рис. 2. Линейный спектр с выделенными резонансными частотами (а) и третьоктавный спектр искусственного акустического сигнала (б) с низкочастотной A_n и высокочастотной A_b составляющими

По линейному спектру ИАС (горизонталь — дискретность частоты 20 Гц, вертикаль — нормированная по максимуму амплитуда) находятся: частота спектрального максимума F , обратно пропорциональная расстоянию до контакта с максимальным ослаблением, и суммарная энергия E — сумма амплитуд резонансных частот в быстром преобразовании Фурье, отражающая интенсивность развития межслоевых деформаций. Значение F^{-1} в меньшей мере, но также отражает развитие межслоевых деформаций.

Для оценки динамики напряженно-деформированного состояния призабойной части массива горных пород вычисляется третьоктавный спектр (логарифмическая шкала частот), определяющий коэффициент относительных напряжений K (доли единиц), равный отношению высокочастотной составляющей спектра к низкочастотной:

$$K = \frac{A_b}{A_n}.$$

Указанные составляющие соответствуют сумме амплитуд спектра, нормированных по максимальному значению. Увеличение значений K соответствует росту напряжений в призабойной части массива и накоплению потенциальной энергии [20].

В рамках данной работы изучены особенности динамики коэффициента относительных напряжений K , частоты спектрального максимума F и суммарной энергии резонансных частот E на участках предполагаемой посадки основной кровли, которые соответствовали расчетным данным и фактам повышенных газовыделений в горных выработках при движении очистного забоя. В качестве объектов исследования выступили очистные забои различных угольных шахт АО “СУЭК-Кузбасс”.

В качестве примера на рис. 3 приведена динамика относительных напряжений K и частота спектрального максимума F на участке посадки пород основной кровли при отработке угольного пласта лавой 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”.

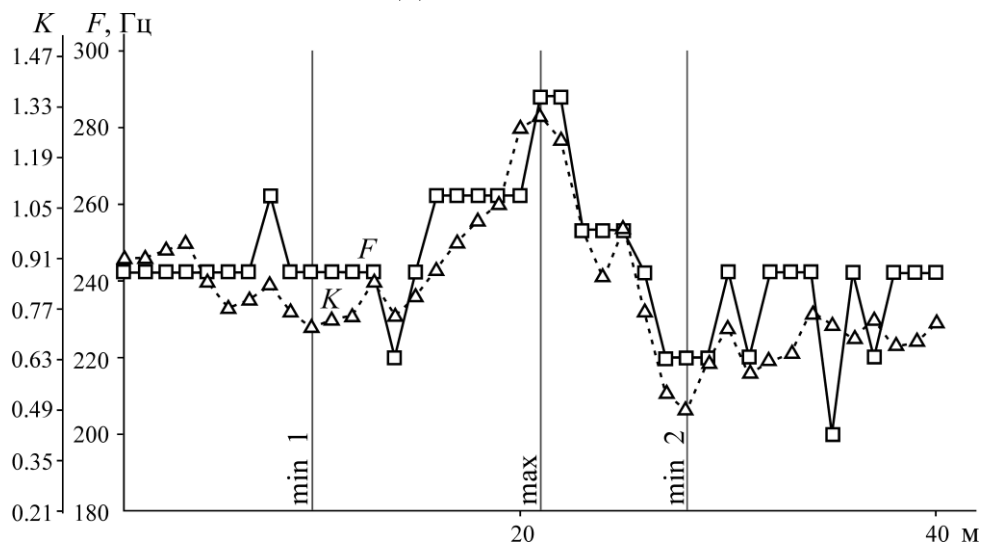


Рис. 3. Коэффициент относительных напряжений K и частота спектрального максимума F на участке посадки основной кровли в вентиляционном штреке 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”

Процессу посадки основной кровли предшествует уменьшение значений коэффициента относительных напряжений K до минимального значения ($\min 1$) с последующим ростом до глобального максимума ($\max$), после которого происходит локальная разгрузка массива ($\min 2$) со смещением и обрушением пород основной кровли. Контакты с максимальным ослаблением (F^{-1}) имеют противоположную динамику: удаление от угольного пласта в зоне минимальных значений ($\min 1$) с последующим приближением к нему в максимуме напряжений ($\max$) и дальнейшим удалением в процессе посадки основной кровли.

В табл. 1 представлены значения коэффициента относительных напряжений K на участках посадки пород при движении лавы 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского” в 2019 г. Аналогичные данные получены при посадке основной кровли в конвейерном штреке. Средние значения отношения коэффициента K ($\max / \min 2$): вентиляционный штрек — 2.74, конвейерный штрек — 2.91, что указывает на более динамичное протекание процесса в конвейерном штреке 5 %.

На рис. 4 обозначены спектры ИАС в трех зонах посадки кровли: на участке первого минимума K наибольшая амплитуда F наблюдается на частоте 60 Гц (расстояние до ОМК с максимальным ослаблением — около 42 м), резонансы распределены на частотах: 220, 400, 460 и 660 Гц. В глобальном максимуме значение частоты спектрального максимума составило 200 Гц (наибольшее ослабление ОМК зафиксировано на расстоянии 12.6 м). Амплитуды на других частотах существенно ниже. На участке сдвигения и обрушения пород (процесс посадки кровли) интенсивные расслоения наблюдаются на расстоянии 42, 18 и 12.6 м.

ТАБЛИЦА 1. Значения коэффициента относительных напряжений K в вентиляционном штреке на участках посадки пород кровли при движении очистного забоя 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”

Мах			Min 1			Min 2			Отношение max / min 1
Дата	Время	Значение	Дата	Время	Значение	Дата	Время	Значение	
20.08.2019	08:14	1.18	20.08.2019	08:00	0.65	20.08.2019	08:22	0.96	1.82
26.08.2019	08:07	1.43	25.08.2019	08:23	0.53	26.08.2019	08:23	0.86	2.70
30.08.2019	08:21	1.61	30.08.2019	08:01	0.58	30.08.2019	08:15	0.95	2.78
04.09.2019	09:13	1.37	04.09.2019	09:06	0.44	04.09.2019	09:22	0.45	3.11
11.09.2019	09:22	1.38	11.09.2019	09:00	0.53	12.09.2019	09:09	0.77	2.60
15.09.2019	09:00	1.33	14.09.2019	09:22	0.85	15.09.2019	09:04	0.86	1.56
24.09.2019	09:05	1.35	23.09.2019	09:21	0.70	24.09.2019	09:14	0.67	1.93
27.09.2019	09:00	1.21	26.09.2019	09:14	0.70	27.09.2019	09:17	0.62	1.73
01.10.2019	10:06	2.20	30.09.2019	09:06	0.90	01.10.2019	10:10	1.16	2.44
08.10.2019	10:19	1.99	08.10.2019	10:06	0.97	08.10.2019	10:13	1.22	2.05
13.10.2019	10:17	2.32	13.10.2019	10:00	1.00	14.10.2019	10:05	0.87	2.32
18.10.2019	10:17	2.02	16.10.2019	10:11	0.64	19.10.2019	10:17	0.50	3.16
20.10.2019	10:13	1.53	18.10.2019	10:18	0.58	20.10.2019	10:15	0.75	2.64
23.10.2019	10:03	1.53	22.10.2019	10:18	0.27	23.10.2019	10:07	0.71	5.67
27.10.2019	10:10	1.74	27.10.2019	10:00	0.72	27.10.2019	10:15	0.81	2.42
31.10.2019	10:00	2.31	29.10.2019	10:20	0.64	01.10.2019	11:03	0.99	3.61
02.11.2019	11:10	2.30	02.11.2019	11:08	0.65	02.11.2019	11:13	1.44	3.54
08.11.2019	11:09	1.46	07.11.2019	11:23	0.40	08.11.201	11:13	1.01	3.65
15.11.2019	11:00	1.00	14.11.2019	11:15	0.81	15.11.2019	11:10	0.77	1.23
21.11.2019	11:07	1.25	21.11.2019	11:04	0.88	21.11.2019	11:18	0.70	1.42
24.11.2019	11:14	2.03	24.11.2019	11:04	0.90	24.11.2019	11:16	1.10	2.26
30.11.2019	11:03	1.32	29.11.2019	11:22	0.32	30.11.2019	11:10	0.28	4.13
04.12.2019	12:22	2.08	04.12.2019	12:11	0.80	05.12.2019	12:03	0.74	2.60
10.12.2019	12:17	1.34	10.12.2019	12:07	0.47	10.12.2019	12:22	0.56	2.85
18.12.2019	12:16	1.66	18.12.2019	12:14	0.57	18.12.2019	12:19	0.79	2.91
21.12.2019	12:21	1.98	21.12.2019	12:15	0.47	22.12.2019	12:02	0.81	4.21

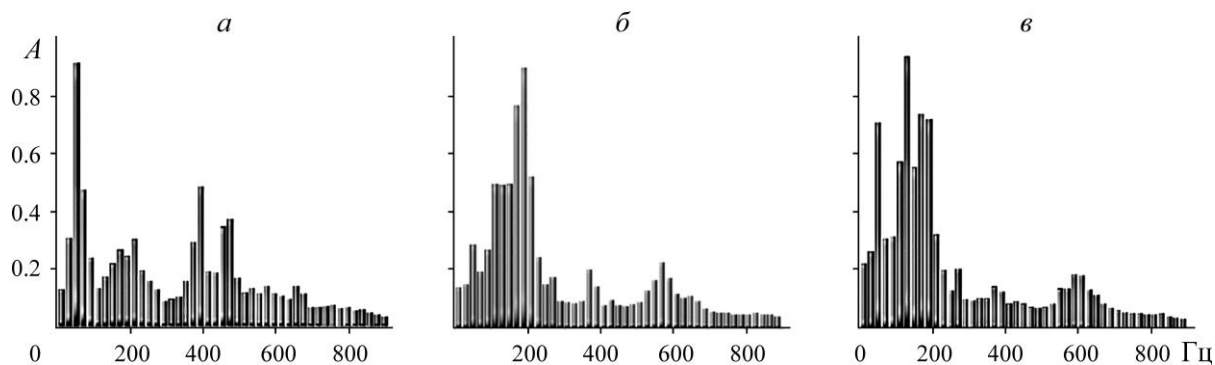


Рис. 4. Спектры ИАС на участке посадки основной кровли в конвейерном штреке 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”: a — min 1 (29.11.2019 00:39); b — max (29.11.2019 17:09); v — min 2 (29.11.2019 21:25)

На основе описываемого метода анализа спектров ИАС в процессе посадки основной кровли исследована динамика процесса. В табл. 2 представлены амплитуды резонансных частот, нормированные по максимальному значению в интервалах расстояний ОМК от угольного пласта. В вентиляционном штреке большее количество ОМК, включая и максимальные расслоения, сосредоточены на расстоянии 9–18 м от угольного пласта. В конвейерном штреке 30 % ОМК расположены на 20–40 м от угольного пласта. Как правило, максимальные расслоения на участках с минимальными напряжениями смещены на удаленные от угольного пласта расстояния.

ТАБЛИЦА 2. Расстояния от угольного пласта до ослабленных межслоевых контактов и относительная интенсивность их ослабления на участках посадки пород кровли фрагмента лавы 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”

Дата	Время	Параметр	Относительная интенсивность ослаблений ОМК в интервалах удаленности от угольного пласта, м						
			42	31 – 21	18 – 11	13 – 10	7 – 9	7 – 5	5 – 4
Вентиляционный штрек									
11.09.2019	15:08	min 1	0.80	—	0.51	1.00	0.68	—	0.10
11.09.2019	20:15	max	0.41	—	0.56	0.73	1.00	—	0.30
11.09.2019	21:53	min 2	0.21	—	0.16	—	1.00	0.25	—
26.09.2019	14:23	min 1	0.14	—	0.53	1.00	0.13	—	0.9
27.09.2019	00:23	max	0.12	—	0.20	—	1.00	—	—
27.09.2019	07:55	min 2	0.42	—	0.55	1.00	—	—	—
19.10.2019	18:33	min 1	1.00	—	0.26	—	0.81	—	0.11
20.10.2019	12:53	max	0.20	—	—	1.00	—	—	—
20.10.2019	17:42	min 2	0.33	—	0.32	0.60	1.00	0.22	—
29.11.2019	22:41	min 1	0.22	—	1.00	—	0.14	—	—
30.11.2019	03:41	max	0.12	0.11	—	1.00	0.42	—	—
30.11.2019	05:10	min 2	0.20	—	1.00	—	0.37	0.13	—
Конвейерный штрек									
10.09.2019	00:02	min 1	—	1.00	—	0.64	0.41	0.15	0.12
10.09.2019	13:35	max	0.25	0.34	1.00	0.86	0.38	0.63	—
11.09.2019	18:43	min 2	0.45	—	1.00	0.58	—	0.20	0.29
28.09.2019	16:40	min 1	1.00	0.63	—	1.00	0.95	0.63	0.52
28.09.2019	23:43	max	0.20	—	—	1.00	—	0.32	0.27
29.09.2019	01:35	min 2	0.15	0.26	—	1.00	0.24	0.27	0.37
18.10.2019	04:04	min 1	—	1.00	0.47	—	0.23	—	0.18
18.10.2019	14:33	max	0.95	0.65	1.00	—	0.60	—	—
19.10.2019	19:02	min 2	1.00	—	—	—	0.52	—	—
29.11.2019	00:39	min 1	1.00	—	—	0.32	—	0.52	0.28
29.11.2019	17:09	max	0.29	0.51	—	1.00	—	0.17	0.23
29.11.2019	21:25	min 2	0.75	—	1.00	0.75	—	0.14	—
18.12.2019	00:12	min 1	0.25	—	—	1.00	0.46	0.22	—
18.12.2019	01:55	max	—	—	—	0.88	1.00	0.62	0.15
18.12.2019	04:51	min 2	—	0.17	—	0.30	1.00	0.28	—

Примечание: Выделены максимально ослабленные контакты (расслоения).

При разработке метода прогноза посадки основной кровли исследованы параметры ИАС, полученные по результатам работы САКСМ на шахтах АО “СУЭК-Кузбасс”. В табл. 3 по этим объектам приведены данные, которые в определенной мере могут оказывать влияние на распределение напряженно-деформированного состояния в призабойной части массива горных пород.

Кроме того, на напряженно-деформированное состояние массива влияет удаленность очистного забоя от монтажной камеры. При условии равенства или превышения его длины в процессе выемки угля в сдвигение горных пород вовлекаются толщи, залегающие выше основной кровли (квадрат сдвижения пород).

ТАБЛИЦА 3. Характеристика исследованных очистных забоев

Параметр	Очистной забой лавы, м		
	24 – 62	18 – 46	50 – 05
Мощность угольного пласта	2.0	3.0	4.0
Длина очистного забоя	300	300	400
Глубина ведения работ	510	440	310
Мощность песчаника основной кровли	До 20	До 20	До 30

Параметр суммарной энергии E вычисляется в каждом цикле одновременно с коэффициентом относительных напряжений K и частотой спектрального максимума F . В очистном забое ИАС возникает в результате работы комбайна по угольному забою. Регистрирующий геофон размещен на секции крепи на постоянном расстоянии от источника колебаний. В качестве параметра E принято усреднение результатов обработки во временных интервалах от 10 мин и более, при том что в секунду поступают около 20 спектров. Локальные изменения параметра E , помимо связи с изменением НДС массива, возможны по следующим причинам: различная нагрузка при ведении выемки угля и зачистки забоя, различная скорость подвигания забоя, неравномерность движения комбайна по забою.

В целях оценки устойчивости параметра E выполнены его усреднения по выборкам объемом 100–1000 наблюдений за период от начала работы лавы до ее завершения (всего 10 участков). Усреднения параметра проведены на следующих участках: от монтажной камеры (МК) до первой посадки основной кровли, при отходе от МК на расстояние, равное длине очистного забоя (набор квадрата сдвижения пород), и в промежутке между данными участками. После отхода от квадрата сдвижения пород объем выборки составил до 1000 наблюдений. По мере приближения к демонтажной камере (ДК) на расстояние, равное определенному квадрату сдвижения пород, также выполнены два усреднения с разным объемом выборки. Результаты оценки стабильности параметра E на указанных участках отхода от МК приведены в табл. 4 и на рис. 5.

При среднем изменении параметров в 2.5 раза на протяжении работы забоев параметр E имеет тенденцию роста по мере отхода от монтажной камеры, а частота спектрального максимума F уменьшается. Следовательно, расстояния h от угольного пласта до контакта с максимальным ослаблением увеличиваются. Резкое увеличение значений параметров E и F в конвейерной и вентиляционной печах лавы 24–62 шахты “Им. С. М. Кирова” на расстоянии до 300 м от монтажной камеры обусловлено наличием геологического нарушения. Локальные увеличения E и F на этом расстоянии от МК зависят от набора квадрата сдвижения пород кровли, а понижение значений этих параметров на расстоянии 1900–2640 м от МК — входом в аналогичный квадрат более устойчивого поведения пород кровли перед демонтажной камерой.

На рис. 6 приведено общее представление о взаимосвязи относительных напряжений и интенсивности развития межслоевых деформаций: увеличение параметра E в зонах снижения коэффициента относительных напряжений K наблюдается на участке посадки основной кровли, подтвержденной фактами повышенных газовыделений в вентиляционном штреке 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”.

Эффективность использования коэффициента относительных напряжений K для выделения участков предполагаемой посадки пород основной кровли обоснована результатами исследований (табл. 1). Для повышения однозначности и устойчивости прогноза посадки основной кровли выполнен дальнейший анализ суммарной энергии резонансов E , частоты максимума спектра F и коэффициента относительных напряжений K на участках повышенных газовыделений в горных выработках.

ТАБЛИЦА 4. Средние значения параметров E и F на различных расстояниях от монтажной камеры по длине выемочного столба в лавах

Пункт наблюдения	Вентиляционный штрек				Конвейерный штрек			
	Расстояние от МК, м	Количество циклов	E	F/h	Расстояние от МК, м	Количество циклов	E	F/h
Лава 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”								
1	60	80	157	159/15.7	60	80	149	265/9.4
2	200	200	204	143/17.5	200	200	194	259/9.6
3	400	1000	212	198/12.6	400	1000	272	410/6.1
4	780	1000	317	249/10.0	780	1000	327	238/10.5
5	1200	1000	474	213/9.3	1200	1000	324	175/14.3
6	1840	1000	371	229/10.9	1840	1000	505	168/14.9
7	2180	1000	439	216/11.6	2180	1000	513	188/13.3
8	2400	400	571	226/11.1	2400	400	385	139/18.0
9	2640	300	409	224/11.2	2640	300	534	179/14.0
10	2740	100	252	228/11.0	2740	100	486	127/19.7
Лава 24–62 шахты “Им. С. М. Кирова”								
1	45	70	192	560/44.6	45	70	532	305/8.2
2	240	500	316	282/8.9	240	500	621	368/7.0
3	300	1000	317	398/6.6	300	1000	573	361/6.9
4	750	1000	166	286/8.7	750	1000	166	286/8.7
5	920	1000	235	247/10.1	920	1000	235	247/10.1
6	1290	1000	286	276/9.1	1290	1000	286	276/9.1
7	1560	1000	253	286/8.7	1560	1000	253	286/8.7
8	1870	1000	428	174/14.4	1870	1000	428	174/14.4
9	2270	300	241	259/9.7	2270	300	241	125/20.0
10	2340	100	286	286/8.7	2340	100	287	128/19.5
Лава 18–46 шахты “Комсомолец”								
1	45	93	454	430/5.8	45	93	504	376/6.6
2	100	220	389	444/5.6	100	220	381	315/7.9
3	300	500	298	464/5.4	300	500	364	272/9.2
4	700	800	260	517/4.8	700	800	330	350/7.1
5	1240	800	327	264/9.5	1240	800	293	133/18.8
6	1600	500	423	197/12.7	1600	500	279	139/18.0
7	1700	200	401	241/10.4	1700	200	287	165/15.2
8	1840	500	427	240/10.4	1840	500	276	151/16.6
9	1900	100	426	195/12.8	1900	100	281	166/15.1

Примечание: E — суммарная энергия резонансных частот, у.е.; F — частота спектрального максимума, Гц; h — расстояние от угольного пласта до контакта с максимальным расслоением, м

Из приведенных на рис. 6 данных следует вывод о необходимости выделения локальных аномалий выбранных параметров. Учитывая стабильность и предсказуемые изменения усредненных параметров, текущие их значения нормируются по усреднению некоторой выборки предшествующих значений:

$$K_n = \frac{K_i}{K_{cp}}, \quad E_n = \frac{E_i}{E_{cp}}.$$

Эксперименты показали, что достаточный объем такой выборки должен составлять не менее 30 предыдущих наблюдений. Прогностический параметр посадки основной кровли равен отношению нормированных значений после усреднения скользящим окном с интервалом в 3 наблюдения:

$$P_{кр} = \frac{K_n}{E_n}.$$

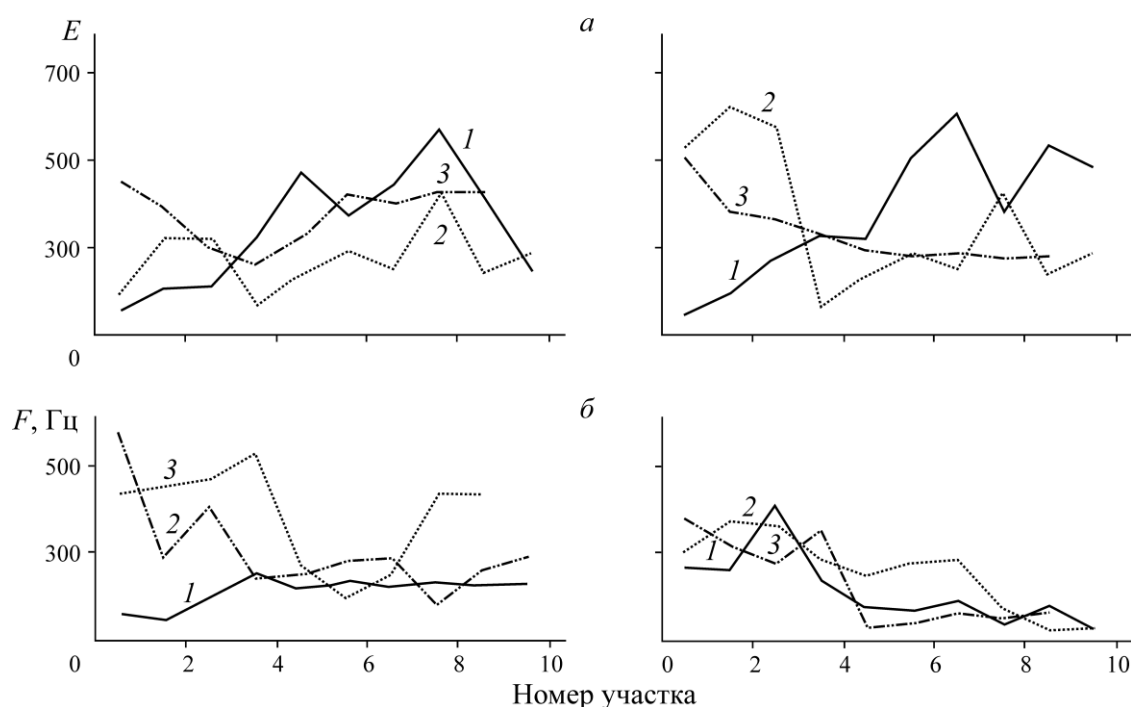


Рис. 5. Усредненные параметры в вентиляционном (слева) и конвейерном (справа) штреках по данным табл. 4: a — суммарная энергия резонанса E ; $б$ — частота спектрального максимума F ; 1 — лава 50–05 шахты “Им. В.Д. Ялевского”; 2 — лава 24–62 шахты “Им. С. М. Кирова”; 3 — лава 18–46 шахты “Комсомолец”

Таким образом, для прогноза посадки основной кровли могут быть приняты коэффициент относительных напряжений K и суммарная энергия резонансов E . В табл. 5 представлены значения данного сопоставления. Среднее значение коэффициента $K=2.4$, суммарной энергии $E=3.2$, частоты спектрального максимума $F=2.0$ (исключая “ураганные” значения — 13.3 и 15.0). Принят пороговый уровень отношений параметров в целях выделения аномальных значений — 1.5, при этом ниже данного уровня — 6 % для K и E , и 56 % — для F .

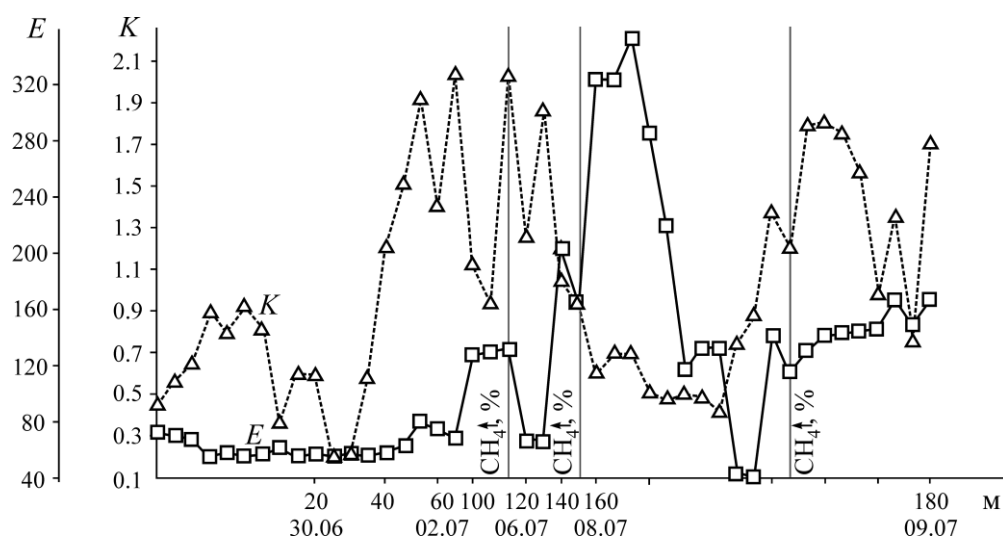


Рис. 6. Коэффициент относительных напряжений K и суммарная энергия резонансов E на участке посадки основной кровли в вентиляционном штреке 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”

ТАБЛИЦА 5. Параметры ИАС на участках посадки основной кровли

Дата	Штрек	Условие	Коэффициент K			Суммарная энергия E			Частота максимума F		
			min	max	$\frac{\max}{\min}$	min	max	$\frac{\max}{\min}$	min	max	$\frac{\max}{\min}$
Лава 18–46 шахты “Комсомолец”											
12.09.2018	Вентиляционный	1-я посадка	0.70	1.30	1.8	120	600	5.0	340	580	1.70
16.09.2018	Вентиляционный	Посадка	0.80	1.06	1.3	150	300	2.0	300	400	1.30
19.10.2018	Конвейерный	Зона ПГД	0.35	2.15	6.1	215	470	2.2	150	450	3.00
27.10.2018	Конвейерный	Ось ПГД	0.60	3.20	5.3	300	420	1.4	290	520	1.80
05.11.2018	Вентиляционный	Квадрат	0.65	1.08	1.7	35	120	3.4	380	500	1.30
23.12.2018	Конвейерный	Посадка	0.45	2.20	4.8	170	380	2.2	80	480	6.00
15.01.2019	Конвейерный	Посадка	1.20	3.20	2.7	160	280	1.8	—	—	—
02.04.2019	Конвейерный	Посадка	0.80	1.90	2.4	100	290	2.9	—	—	—
22.05.2019	Конвейерный	Посадка	0.60	2.40	4.3	130	300	2.3	—	—	—
27.06.2019	Вентиляционный	Посадка	0.72	1.10	1.5	280	600	2.1	—	—	—
Лава 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”											
08.07.2018	Вентиляционный	1-я посадка	0.20	2.15	10.8	100	325	3.2	100	280	2.80
02.08.2019	Вентиляционный	Посадка	0.80	1.40	1.8	85	140	1.6	220	240	1.10
05.08.2019	Конвейерный	Посадка	0.80	1.80	2.2	440	520	1.2	190	300	1.60
14.08.2019	Вентиляционный	Посадка	0.21	1.20	5.7	360	530	1.5	60	360	6.00
18.08.2019	Вентиляционный	Квадрат	0.81	1.53	1.9	120	540	4.5	260	280	1.10
20.08.2019	Конвейерный	Квадрат	0.90	1.70	1.9	140	900	6.4	280	280	1.00
23.08.2019	Конвейерный	Посадка	1.30	2.40	1.8	200	520	2.6	350	420	1.20
25.05.2019	Вентиляционный	Посадка	0.60	1.30	2.2	160	600	3.8	260	260	1.00
05.09.2019	Вентиляционный	Посадка	0.75	1.35	1.8	120	280	2.3	220	300	1.40
05.09.2019	Конвейерный	Посадка	0.90	1.50	1.7	80	240	3.0	290	330	1.10
17.09.2019	Вентиляционный	Посадка	0.65	1.50	2.3	120	850	7.1	240	280	1.20
19.10.2019	Конвейерный	Посадка	0.60	4.20	7.0	200	330	1.6	60	220	3.70
19.10.2019	Вентиляционный	Посадка	0.90	1.50	1.7	210	440	2.1	200	222	1.10
02.11.2019	Вентиляционный	Ось синклинальная	0.90	2.40	2.7	330	850	2.6	360	360	1.00
29.11.2019	Вентиляционный	Посадка	0.30	1.40	4.3	150	750	5.0	145	180	1.20
15.12.2019	Конвейерный	Ось синклинальная	0.85	2.10	2.6	420	900	2.1	180	280	1.60
19.02.2020	Конвейерный	Посадка	0.70	1.50	2.1	350	860	2.5	150	200	1.40
05.03.2020	Вентиляционный	Посадка	0.35	2.10	6.0	180	1170	6.5	120	560	4.70
07.04.2020	Вентиляционный	Посадка	0.70	1.80	2.6	100	470	4.7	160	280	1.80
Лава 24–62 шахты “Им. С. М. Кирова”											
14.06.2019	Вентиляционный	1-я посадка	1.65	3.90	2.4	135	270	2.0	300	860	2.87
16.06.2019	Конвейерный	1-я посадка	0.42	1.15	2.7	200	520	2.6	60	800	13.33
02.07.2019	Вентиляционный	Посадка	0.12	0.32	2.7	140	720	5.1	400	400	1.00
10.07.2019	Конвейерный	Посадка	0.55	1.15	2.1	400	1400	3.5	320	400	1.25
10.07.2019	Вентиляционный	Посадка	0.80	3.20	4.0	130	320	2.5	320	400	1.25
16.07.2019	Вентиляционный	Геологическое нарушение	0.85	1.60	1.9	170	730	4.3	620	680	1.10
16.07.2019	Конвейерный	Посадка	0.30	2.80	9.3	100	1300	1.3	140	770	5.50
24.07.2019	Вентиляционный	Квадрат	0.35	1.85	5.3	150	400	2.7	—	—	—
24.07.2019	Конвейерный	Квадрат	0.60	1.40	2.3	80	250	3.1	80	320	4.00
14.10.2019	Вентиляционный	Геологическое нарушение	0.70	1.60	2.3	170	560	3.3	—	—	—
12.11.2019	Конвейерный	Посадка	0.35	1.30	3.7	100	320	3.2	60	230	3.83
27.01.2020	Вентиляционный	Посадка	1.10	1.52	1.4	300	1000	3.3	300	300	1.00
07.02.2020	Вентиляционный	Посадка	1.00	1.75	1.8	150	250	1.7	300	800	2.67
29.02.2020	Конвейерный	Посадка	0.90	1.35	1.5	170	370	2.2	180	180	1.00
08.04.2020	Вентиляционный	Посадка	0.95	1.35	1.5	400	600	1.5	330	700	2.12
22.04.2020	Конвейерный	Посадка	0.90	1.30	1.4	200	500	2.5	20	300	15.00
09.05.2020	Вентиляционный	Посадка	0.70	1.12	1.6	220	450	2.0	290	320	1.10
27.06.2020	Конвейерный	Посадка	0.70	1.90	2.7	205	275	1.3	140	340	2.43

Аномалии параметров ИАС перед посадкой основной кровли характеризуются чередованием минимальных и максимальных значений (рис. 6). Для определения момента посадки установлены два пороговых значения: по предшествующему минимуму — 0.8 и по максимуму — 1.5. За пределами пороговых значений должно быть не менее трех наблюдений, время объявления “Прогнозируется посадка основной кровли” происходит при превышении порогового уровня 1.5 и наличии перед этим значений ниже минимума 0.8. Динамичность посадки основной кровли оценивается как опасная по превышению параметром $P_{кр}$ второго уровня порогового значения 3.0 (обрушение пород кровли, загазирование выработок и др.).

На рис. 7 представлены результаты применения такого алгоритма по данным САКСМ на отдельном участке лавы 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского”. Заштрихованные части графиков обозначают превышение порогового уровня прогностического параметра $P_{кр}$. На расстоянии около 60 м от монтажной камеры произошла первая посадка основной кровли, которая сопровождалась загазированием выработок (рис. 6). Максимальное значение прогностического параметра — 2.1, сообщение о прогнозируемой посадке основной кровли зафиксировано 06.07.2019 в 08:58 за 30 ч до возможных динамических явлений. На рис. 7, помимо четко выраженного участка аномальных значений прогностического параметра $P_{кр}$, установлен еще один участок, который из-за небольшого и существенно отстоящего минимума условно можно отнести к удовлетворяющему требованиям алгоритма. Он расположен на расстоянии около 10 м от МК и, вероятно, обусловлен обрушением непосредственной кровли, представленной преимущественно алевролитом.

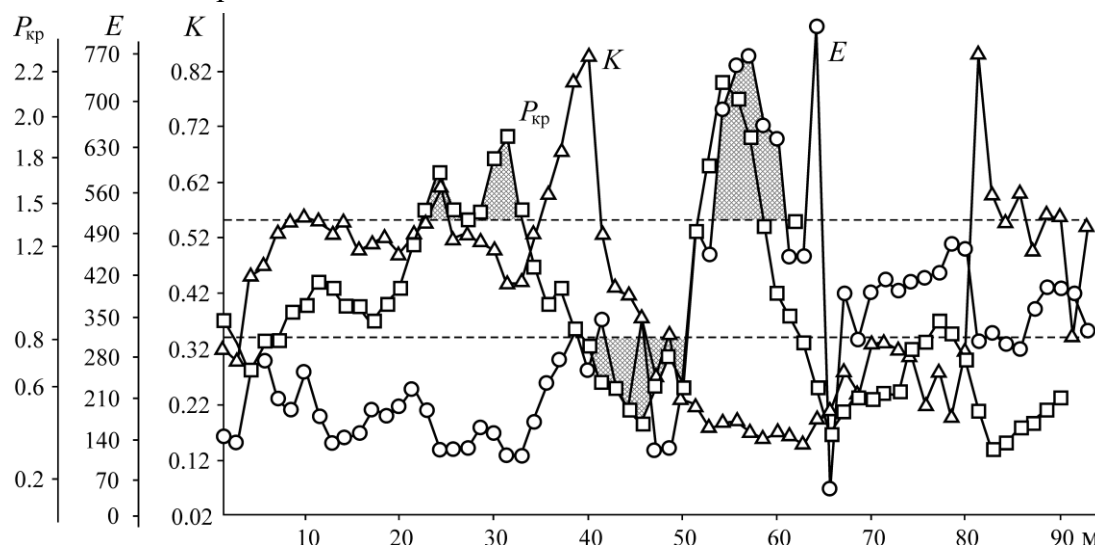


Рис. 7. Коэффициент относительных напряжений K , суммарная энергия резонансов на пункте наблюдений E и прогностический параметр посадки основной кровли $P_{кр}$ в лаве 50–05

Проверка работы алгоритма выполнена еще на 9 объектах трех шахт с положительными результатами. Максимальные значения прогностического параметра $P_{кр}$ составили 1.7–3.0, в среднем 2.1. По объектам лавы 50–05 шахты “Им. В. Д. Ялевского” данные наиболее устойчивы.

ВЫВОДЫ

С учетом полученных результатов исследований искусственных акустических сигналов при использовании программно-аппаратного комплекса САКСМ, в том числе особенностей динамики основных параметров (K , E , F), подтверждена их эффективность в целях выделения участков предполагаемой посадки пород основной кровли.

Установлены зависимости распределения суммарной энергии резонансных частот E и частоты спектрального максимума F , характеризующие интенсивность развития межслоевых деформаций и распределение ослабленных межслоевых контактов в призабойной части массива горных пород. Достоверность исследования динамики параметров подтверждена соответствием расчетных данных фактам повышенных газовыделений в горных выработках при движении очистных забоев различных угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс».

Доказанность взаимосвязи относительных напряжений и интенсивности развития межслоевых деформаций по характеру изменения параметров K и E на участках посадки основной кровли позволила выделить и испытать в различных горно-геологических условиях прогностический параметр $P_{кр}$. При его помощи определяется момент посадки основной кровли и оценивается степень динамичности данного процесса, что повышает устойчивость прогноза посадки основной кровли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костеренко В. Н., Воробьева О. В., Артемьев В. Б. Обрушение горных выработок. — М.: Киммерийский центр, 2015 — 534 с.
2. Артемьев В. Б., Коршунов Г. И., Логинов А. К., Шик В. М. Динамические формы проявления горного давления. — СПб.: Наука, 2009. — 346 с.
3. Ключко И. И., Лобков Н. И. Особенности изменения напряженного состояния впереди лавы в процессе выемки угля // Вісті Донецького гірничого інституту. — 2011. — № 2. — С. 136–141.
4. Временная инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения труднообрушаемой кровли на выемочных участках. — Л.: ВНИМИ, 1976. — 141 с.
5. Анциферов М. С., Анциферова Н. Г., Коган Я. Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. — М.: Наука, 1971. — 134 с.
6. Мирер С. В., Хмара О. И., Масленщиков Е. В. О контроле выбросоопасности забоев по спектральным характеристикам акустических сигналов // Вопросы предотвращения внезапных выбросов. Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 1987. — С. 52–61.
7. Бизяев А. А., Воронкина Н. М., Савченко А. В., Цупов М. Н. Методика бесконтактного определения опасно нагруженных зон в массиве горной выработки // Уголь. — 2019. — № 11. — С. 27–31.
8. Яковлев Д. В., Мулев С. Н., Яковлев В. А. и др. Система сейсмического мониторинга GITS. / Сб. науч. тр. ВНИМИ. — СПб, 2012. — С. 18–25.
9. Анциферов А. В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. — Донецк: Алан, 2003. — 312 с.
10. Писецкий В. Б., Лапин Э. С., Зудилин А. Э., Лапин С. Э., Бабенко А. Г., Абатурова И. В., Патрушев Ю. В., Александрова А. В., Шинкарьук В. А. Методы и технологии прогноза структуры и оценки параметров геодинамического состояния геологической среды по сейсмическим данным в приложениях нефтегазовой, горнодобывающей и строительной отраслях // Материалы научного семинара «Геодинамика, Геомеханика и Геофизика». — Новосибирск, 2013. — С. 31.
11. Otto R., Button E. A., Bretterebner H., and Schwab P. The application of TRT — true reflection tomography — at the unterwald tunnel. Felsbau, 2002, Vol. 20, No. 2. — P. 51–56.
12. Kase E. J., Ross T., Li P. H., and Henthorne R. W. Seismic imaging to determine extent of sinkholes: rockvision3D case studies, 2003.
13. Lu X., Liao X., Wang Y., Wang G., Fu Z., and Tai H. The tunnel seismic advance prediction method with wide illumination and a high signal-to-noise ratio, Geophysical Prospecting, 2020, Vol. 68, Issue 8. — P. 2444–2458.

14. 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 пром-сти. — 2015. — № 8. — С. 32–37.
15. 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.
16. Смирнов О. В., Кулик А. И., Шилов В. И., Горбачев А. С. Автоматизированный прогноз динамических явлений // Добывающая пром-сть. — 2016. — Вып. 2. — С. 56–63.
17. Костеренко В. Н., Смирнов Р. О., Аксенов З. В. Динамика газовыделений в очистных забоях // Горн. пром-сть. — 2019. — № 2. — С. 52–56.
18. Гликман А. Г. Физика и практика спектральной сейсморазведки / Электронное изд-е (www.newgeophys.spb.ru). 2002. — 110 с.
19. Гликман А. Г. Основы спектральной сейсморазведки / Электронное изд-е (www.newgeophys.spb.ru), 2013. — 196 с.
20. Аксенов З. В. Исследование межслоевых деформаций, возникающих при посадке основной кровли угольного пласта // ГИАБ. — 2021. — № 9. — С. 23–35.

Поступила в редакцию 16/III 2022

После доработки 06/VI 2022

Принята к публикации 30/VI 2022