

УДК 622.25

**АКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА
КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

М. Ройтер, М. Крах, У. Кисслинг, Ю. Векслер

*Marco Systemanalyse und Entwicklung GmbH,
E-mail: Sekretariat@marco.de, Hans-Böckler-Str., 2, г. Дахау, Германия*

На основе математического моделирования геомеханического состояния очистного забоя показано развитие разрушения призабойной части пласта в форме отжима и растрескивания в течение рабочего цикла. Проведен анализ акустического шума лавы и определена частота его спектрального максимума, отражающая размер площади разрушения массива в окрестности забоя лавы.

Очистной забой, отжим пласта, растрескивание, акустический шум, частота спектрального максимума.

DOI: 10.15372/FTPRPI20220103

С углублением горных работ и повышением их интенсивности возрастает опасность газодинамических проявлений горного давления (ГДЯ) в очистных забоях угольных шахт. Для обеспечения их безопасной и высокопроизводительной работы необходимы эффективные методы прогноза и предотвращения ГДЯ, а также автоматизация прогноза, не требующая остановки горных работ. Этим требованиям отвечают методы, основанные на анализе акустической эмиссии (АЭ) массива, отражающей разрушения в окрестности очистных забоев, инициирующих проявления горного давления. Оценка акустической эмиссии массива проводится в методах прогноза горного давления по анализу амплитудно-частотной характеристики спектров импульсов АЭ и ее активности или по анализу акустического шума (далее шума) работающей лавы [1 – 4].

В [5] анализ шума лавы проводится по отношению текущей медианы амплитудно-частотной характеристики шума работающего оборудования к ее критическому значению. В нормативном методе прогноза оценивается отношение высокочастотной и низкочастотной частей спектра шума работающей лавы [6, 7]. Предлагается одновременное определение показателя выбросоопасности спектрально-акустическим и эталонным инструментальным методами прогноза в одном и том же проходческом забое [8].

Акустический шум в лаве формируется многими источниками, но прослушивание записи шумов работы лавы позволяет предположить, что основной вклад в шум создается процессом разрушения призабойной части пласта. Об этом свидетельствуют данные [9], где указывается, что источником акустических колебаний является процесс разрушения угольного забоя, вызываемый воздействием рабочего органа механизированного комплекса и другого оборудования. На приведенной в [9] схеме работы лавы источником акустических колебаний указана зона отжима пласта. Акустический шум возникает также при фильтрации газа через пористую среду или потоком воды в трещине [10, 11].

ОТЖИМ И РАСТРЕСКИВАНИЕ ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА

В [12] отмечается, что горным инженерам давно известна связь между выбросом и размером зоны отжима. При управлении кровлей частичной закладкой выработанного пространства бутовыми полосами к выбросу приводит уменьшение размера зоны отжима вследствие приближения опорного давления к забою. Однако при работе современных очистных забоев с управлением кровлей полным обрушением эта закономерность может быть иной.

С целью установления закономерности разрушения пласта рассмотрим геомеханическое состояние лавы на основе решения плоской задачи теории ползучести с большими деформациями. Постановка краевой задачи приведена в [13]. Результаты не относятся к концевым участкам лавы, где деформация вдоль ее длины не равна нулю.

Задача решается методом конечных элементов по программе фирмы Марко на языке программирования Fortran. Исходные данные задачи приняты для условий лавы на шахте “Им. С. М. Кирова” АО “СУЭК-Кузбасс”: глубина разработки 380 м, первоначальное напряженное состояние массива принято гидростатическим, мощность пласта 2.3 м, длина зависающей консоли кровли 6–12 м, рабочий цикл в лаве 59 мин. Физико-механические свойства пласта и вмещающих пород приняты по данным шахты.

Оценка разрушения пород выполняется согласно критериям Кулона–Мора, предельного напряжения растяжения и критерия длительной прочности пород по интенсивности напряжений. Элементы, удовлетворяющие любому из критериев разрушения, образуют в пласте зоны отжима и трещинообразования. Зону отжима составляют разрушенные элементы, имеющие свободную поверхность и могущие выпасть из пласта. Они удаляются из расчетной схемы, создавая новый контур забоя. Оставшиеся элементы образуют зону трещиноватости с уменьшенными модулем упругости и прочностными параметрами.

На части из расчетной схемы задачи (рис. 1) показаны пласт, его почва и непосредственная кровля и рассчитанные области разрушения пласта. Длина консоли кровли составляет 12 м.

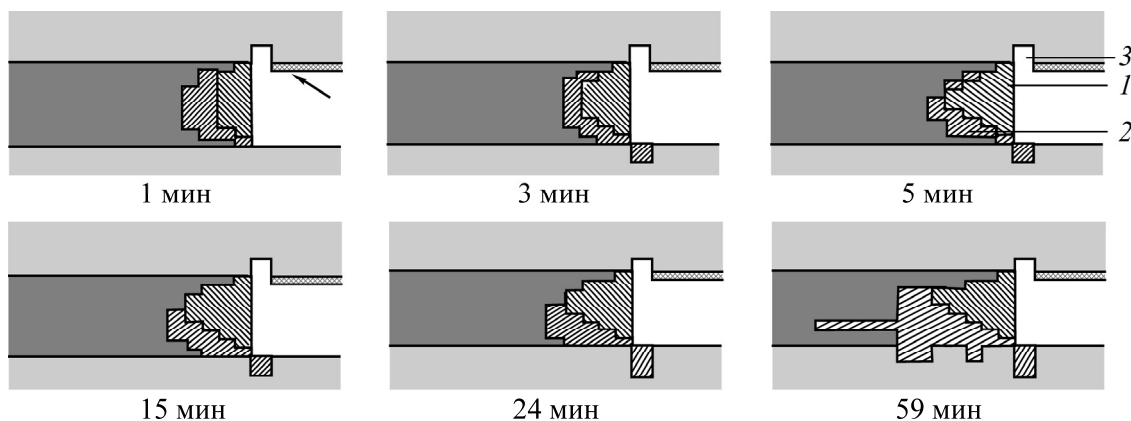


Рис. 1. Динамика разрушения пласта и пород кровли и почвы у отдельной секции крепи в течение рабочего цикла от 1-й до 59-й мин: 1 — отжим пласта; 2 — зона трещиноватости; 3 — разрушение части кровли — “закол”; стрелка указывает часть перекрытия крепи

В течение рабочего цикла последовательно увеличиваются области отжима пласта и возникающих трещин в зоне опорного давления лавы. В реальных условиях граница зоны отжима пласта будет зависеть от сцепления кусков угля в разрушенной области. При сильном сцеплении объем вывалов и отжим забоя уменьшаются.

Количественные изменения суммарной площади разрушения пласта у одной секции в течение рабочего цикла представлены на рис. 2.

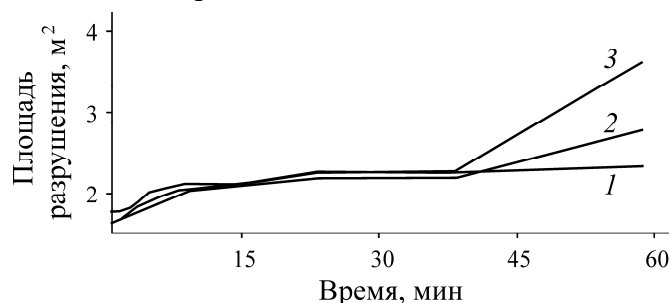


Рис. 2. Площадь разрушения призабойной зоны пласта при различных длинах консоли кровли: 1 — 6 м; 2 — 8; 3 — 12 м

Площадь разрушения у секции увеличивается со временем так же, как и ползучесть пород — с уменьшающейся и постоянной скоростью и с ускорением. Максимальное разрушение у секции происходит в конце рабочего цикла. Увеличение длины консоли при подвигании лавы приводит к усилению разрушения угля в призабойной зоне пласта. При резком увеличении зон отжима и растрескивания возможно выдавливание пласта. Зависимость отжима забоя от свойств вмещающих пород, которая исследуется в [14], не рассматривается.

Область разрушения пласта вдоль длины лавы изменяется со временем. Состояние призабойной части пласта к окончанию рабочего цикла показано на рис. 3.

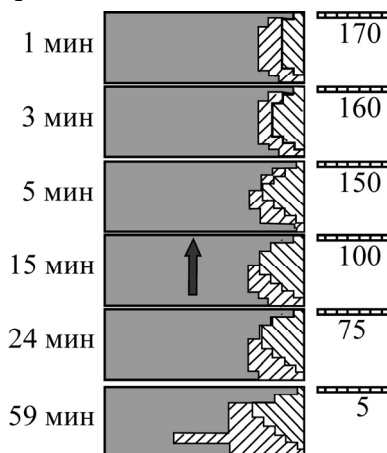


Рис. 3. Разрушение пласта вдоль забоя лавы: отжим пласта и зона трещиноватости, как на рис. 1; стрелка указывает направление движения комбайна; числа под перекрытиями секции — их номера; слева указано время после прохода комбайна

Зоны трещиноватости и отжима увеличиваются по мере удаления комбайна от секции. К концу цикла формируется неравномерная вдоль длины лавы зона разрушения. Максимальное разрушение происходит у начальной пятой секции.

В рассмотренной задаче не учитывается волнообразное распределение горного давления в лаве [15]. Однако при практической оценке акустической эмиссии массива этот фактор следует принимать во внимание. Исследования в нескольких лавах на шахтах в Донбассе зафиксировали волнообразное изменение объема отжатого угля по длине забоя вследствие волнообразного изменения горного давления по длине лавы [16, 17].

РАЗРУШЕНИЕ ПРИЗАБОЙНОЙ ЧАСТИ ПЛАСТА И ЧАСТОТА СПЕКТРАЛЬНОГО МАКСИМУМА ШУМА ЛАВЫ

Исследованиями установлено, что частота спектрального максимума АЭ отражает размер зоны разрушения в массиве. При увеличении очага разрушения основная частота импульса снижается [1].

В сейсмологии площадь поверхности разрыва определяется по среднему радиусу очага разрушения R [18]. Для расчета R используется формула Бруна [19]:

$$R = \frac{2.34V}{2\pi f_0}, \quad (1)$$

где V — скорость распространения поперечной волны; f_0 — частота угловой точки амплитудного спектра Фурье.

В [20] показано, что площадь разрыва S , скорость его распространения или скорость поперечных волн v и угловая частота ω_c связаны соотношением

$$S = \frac{kv^2}{\omega_c^2}, \quad (2)$$

коэффициент k изменяется в широких пределах до 40 раз.

В очистном забое зоны разрушения в пласте, в отличие от очагов разрушения, описываемых закономерностями (1) и (2), простираются вдоль длины лавы, постоянно изменяются в течение рабочего цикла и при подвигании лавы.

Поскольку частота спектрального максимума импульса АЭ обратно пропорциональна длине возникшей трещины [21], то, следуя закономерностям (1) и (2), полагаем, что частота спектрального максимума шума лавы отражает площадь разрушения массива. По ее изменению можно судить о тенденции разрушения пород в окрестности очистного забоя при подвигании лавы.

АНАЛИЗ ШУМА ЛАВЫ

Рассмотрим сейсмограммы АЭ, полученные при сейсмоакустическом мониторинге в лаве на шахте “Им. С. М. Кирова” АО “СУЭК-Кузбасс” в мае 2018 г. [3]. В данном эксперименте датчики укреплялись на перекрытиях секций крепи 7, 60, 70, 80, 89, 100 и 110 у стойки.

Область измерения частот датчика Марко psksb составляет 2.5–25 000 Гц при собственном резонансе 50 кГц. Радиус его действия 15 м. Сейсмоакустическая информация передается на приборы управления рт32 на секциях крепи и далее на подземный и поверхностный компьютеры для анализа.

В эксперименте зарегистрировано 78 сигналов шума, из них 16 с помехами. Сейсмограммы принятых к анализу сигналов шума лавы и их типичные спектры, рассчитанные по программе Audacity, приведены на рис. 4. Спектр шума лавы лежит в полосе частот 16–3991 Гц и имеет несколько пиков. Максимумы спектра $f_{\max}$ в обоих случаях расположены в области низких частот, далее амплитуды уменьшаются. Пики на частоте, кратной 1715 Гц, с небольшими амплитудами соответствуют работе конвейера. На рис. 5 представлены результаты измерений шума лавы: максимумы спектров шума находятся на низких частотах от 33 до 198 Гц и изменяются волнообразно во времени.

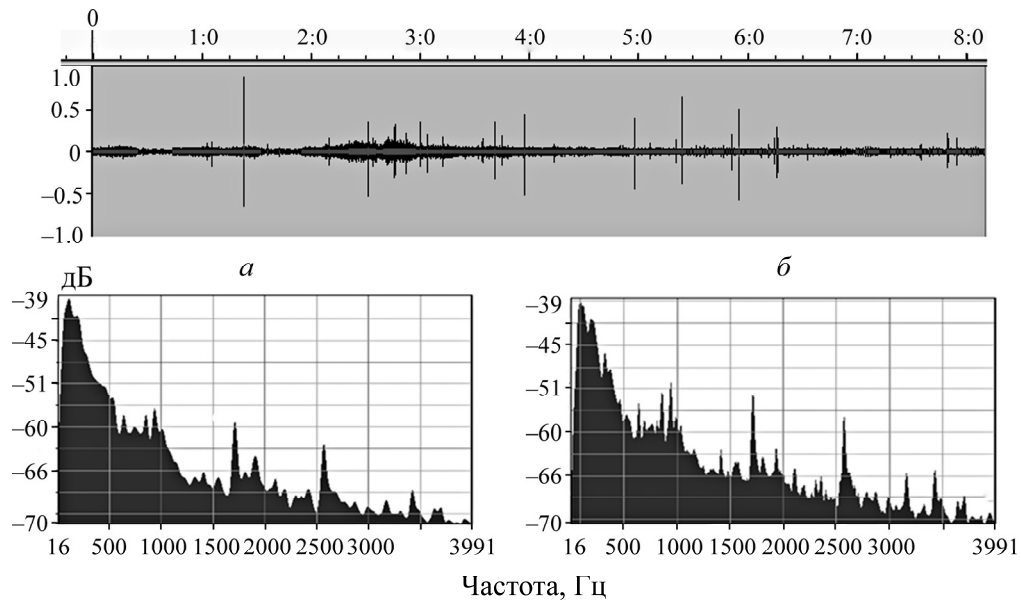


Рис. 4. Сейсмограмма шума лавы в течение 8 мин и его спектры: *а* — сразу после начала записи в момент времени $t=0$; *б* — после прохода комбайна, передвижки и распора секции крепи в момент времени $t=3$ мин; максимумы спектров: *а* — 115 Гц / -39.4 дБ; *б* — 96 Гц / -42.9 дБ

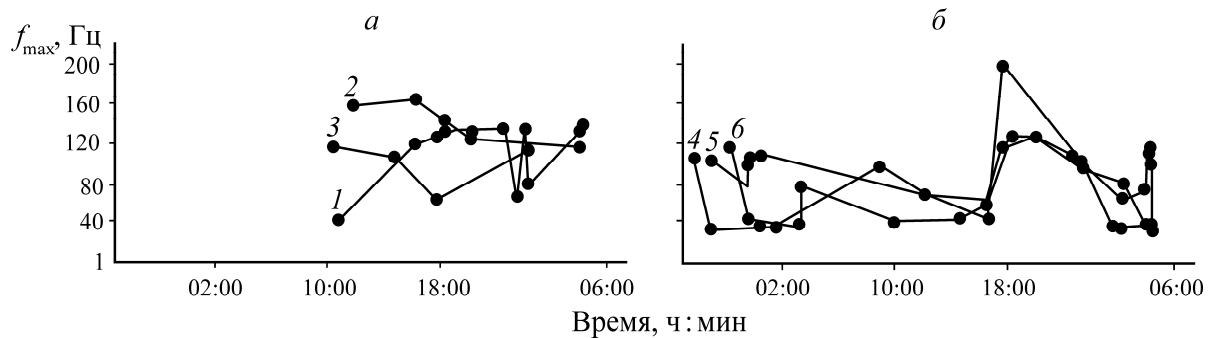


Рис. 5. Изменения частоты спектральных максимумов шума лавы у секций крепи во времени: 1 — секция 60; 2 — 70; 3 — 80; 4 — 110; 5 — 100; 6 — 89

Сравнение спектров шума лавы, полученных сразу после включения датчиков, в которые попадает и работа комбайна, а также после прохода комбайна, передвижки и распора крепи, определенные в некоторые моменты времени, показано на рис. 6.

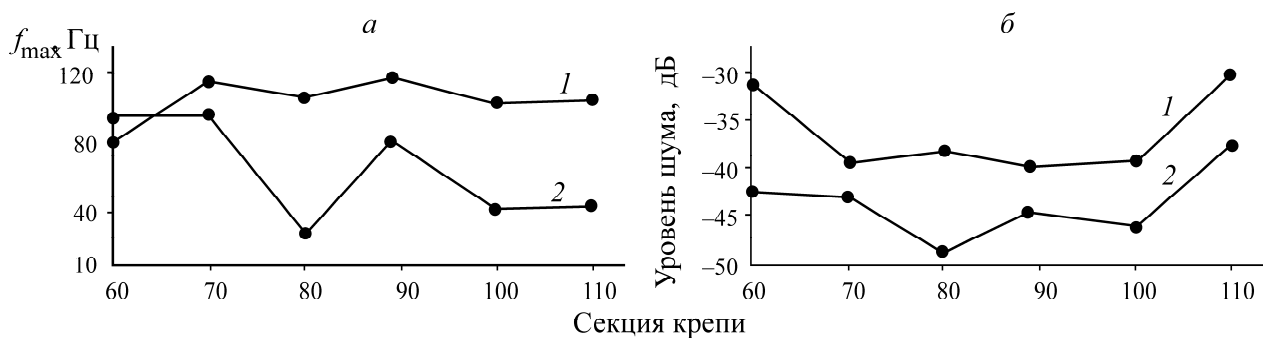


Рис. 6. Частота спектрального максимума (*а*) и уровень шума лавы (*б*) у некоторых секций сразу после начала записи (*1*) и после прохода комбайна, передвижки и распора секции крепи (*2*)

Качественное распределение частот спектральных максимумов шума лавы в обоих случаях одинаково. Они выше при работе комбайна, за исключением секции 60. Шум лавы при работе комбайна выше.

Можно полагать, что максимальная область разрушения массива возникает в окрестности секций 80, 100 и 110, где соответствующие частоты минимальны. У секции 110 уровень шума максимальный, что можно объяснить большей интенсивностью разрушения призабойной части пласта.

По изменению частоты спектрального максимума искусственного акустического сигнала шума в нормативном методе можно также оценивать и тенденцию развития разрушения пласта [7].

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Комплекс прогностических параметров проявлений горного давления, отражающий процесс разрушения массива в призабойной части пласта и формирование опасной ситуации, может включать основные параметры спектра акустической эмиссии массива (рис. 7).



Рис. 7. Схема сейсмоакустического мониторинга массива

Активность акустической эмиссии отражает количество возникших трещин в заданное время, средняя частота максимумов спектров импульсов АЭ является качественной характеристикой ее активности и определяет среднюю длину трещин для оценки ситуации в массиве при одинаковых значениях активности АЭ. Частота следования импульсов акустической эмиссии характеризует интенсивность процесса разрушения: с замедлением, с постоянной скоростью или с ускорением. Частота спектрального максимума шума лавы определяет размер области разрушения массива. Повышение активности АЭ может происходить при усилении горного давления из-за удлинения зависающей консоли кровли в выработанном пространстве лавы, при приближении лавы к зоне повышенного горного давления или при возникновении очага разрушения в удаленных от забоя зонах геологических нарушений или дезинтеграций массива.

При слиянии зон трещиноватости у забоя лавы и у очага разрушения в геологическом нарушении или в области дезинтеграции массива при подходе лавы может выделяться значительная энергия, способная инициировать горное давление.

О приближении забоя лавы к аномалиям строения пласта может свидетельствовать уменьшение частоты спектрального максимума шума лавы. Пороговые значения активности акустической эмиссии и продолжительность ее записи определяются в соответствии с нормативными требованиями [7]. Для установления формирования опасной по ГДЯ ситуации оценка активности АЭ должна проводиться одновременно на всех секциях крепи с установленными датчиками.

Вследствие возникновения вдоль забоя лавы различных по величине зон разрушения значения шума лавы, записанные одновременно у разных секций, будут различными. Для получения сравнимых результатов записи шума лавы необходимо выполнять в одинаковых условиях — сразу после прохода комбайна у секции крепи и ее передвижки и распора. В рассматриваемом случае пороговому значению частоты спектрального максимума шума лавы соответствует частота 33 Гц.

ВЫВОДЫ

Представлены результаты численного моделирования геомеханического состояния очистного забоя на шахте “Им. С. М. Кирова” АО “СУЭК-Кузбасс”. Показано неравномерное разрушение призабойной зоны пласта вдоль длины лавы в течение рабочего цикла.

На основе анализа акустического шума работающей лавы обосновано значение частоты спектрального максимума акустического шума как прогностического параметра, отражающего площадь разрушения массива в окрестности забоя. При частоте спектрального максимума шума лавы ниже ее установленного в длительных наблюдениях минимального значения можно предполагать возможное приближение лавы к участку геологического нарушения пласта или к зоне дезинтеграции массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов М. С., Анциферова Н. Г., Каган Я. Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. — М.: Наука, 1971. — 136 с.
2. Лунев С. Г., Колчин Г. И. Параметры акустического сигнала при контроле выбросоопасности // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. МакНИИ. — 2002. — С. 45–52.
3. Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю., Копылов К. Н., Костеренко В. Н., Смирнов Р. В., Аксенов З. В. Сейсмоакустический мониторинг автоматизированной лавы // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 206–210.
4. Ройтер М., Крах М., Кисслинг У., Векслер Ю. Сейсмоакустический мониторинг геодинамического состояния массива вокруг забоев горных выработок // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — Новокузнецк: СибГИУ, 2021. — № 7. — С. 19–23.
5. Шадрин А. В., Контримас Ф. Ф. Методика определения критерия выбросоопасности по медиане амплитудно-частотной характеристики шумов работающего оборудования // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — Новокузнецк: СибГИУ, 2020. — № 6. — С. 331–337.
6. Копылов К. Н., Смирнов О. В., Кулик А. И. Акустический контроль состояния массива и прогноз динамических явлений // Безопасность труда в пром-сти. — 2015. — № 8. — С. 32–37.
7. Приказ Ростехнадзора № 515 от 10.12.2020 г. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности “Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений”. — Зарегистрировано в Минюсте РФ 30.12.2020 г., № 61949.
8. Шадрин А. В., Клишин В. И., Днюк Ю. А. Методика определения критерия выбросоопасности спектрально-акустического метода прогноза // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — Новокузнецк: СибГИУ, 2021. — № 7. — С. 324–329.
9. Король В. И., Скобенко А. В. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах. — Днепропетровск: НГУ, 2013. — 181 с.
10. Метелев И. С., Овчинников М. Н., Марфин Е. А., Гайфутдинов Р. Р., Сагиров Р. Н. Исследование акустических шумов при фильтрации газа через пористую среду // Акуст. журн. — 2019. — Т. 65. — № 2. — С. 214–222.
11. Сердюков С. В., Азаров А. В. Возбуждение сейсмических колебаний потоком воды в трещине и определение его параметров по регистрируемому излучению // ФТПРПИ. — 2021. — № 5. — С. 22–35.

12. Котлов Э. С., Сорочинский Б. Т. Изменение величины зоны отжима как метод определения выбросоопасности участков очистного забоя // ФТПРПИ. — 1965. — № 3. — С. 35–42.
13. Векслер Ю. А., Тутанов С. К. Расчет больших деформаций ползучести и разрушения горных пород вокруг выработок // Прикл. механика. — 1983. — Т. 19. — № 8. — С. 108–110.
14. Зборщик М. П., Осокин В. В., Соколов Н. М. Предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах. — Киев: Техника, 1984. — 148 с.
15. Ройтер М., Курфюрст В., Майрхофер К., Векслер Ю. Волнообразное распределение горного давления вдоль забоя лавы // ФТПРПИ. — 2009. — № 2. — С. 38–45.
16. Шинкевич М. В. Изменения горного давления по длине лавы // Вестн. НЦ ВостНИИ. — 2018. — № 3. — С. 38–44.
17. Чехместеренко Н. В. Изменчивость отжима угля по длине очистных забоев // Уголь. — 1992. — № 6. — С. 38–45.
18. Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 9–27.
19. Ризниченко Ю. В., Джибладзе Э. А., Болквадзе И. Н. Спектры колебаний и параметры очагов землетрясений Кавказа // Исследования по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 74–86.
20. Виноградов С. Д., Кузнецова К. И., Москвина А. Г., Штейнберг В. В. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн // Физические процессы в очагах землетрясений. — М.: Наука, 1980. — С. 129–140.
21. Парийский Б. С., Радченко В. П., Кейлис-Борок В. И. Продольные волны, возникающие при разрыве // Анализ сейсмических наблюдений на электронных машинах (Вычисл. сейсмология; Вып. 1). — М.: Наука, 1966. — С. 92–106.

*Поступила в редакцию 19/X 2021
После доработки 14/XI 2021
Принята к публикации 24/XII 2021*