

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.831

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ПО ЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

А. А. Бизяев^{1,2}, А. Г. Вострецов^{1,2}, И. И. Смирнягин¹, М. Д. Шарапова¹

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,

E-mail: bizyaev@yandex.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет,
просп. Карла Маркса, 20, 630073, г. Новосибирск, Россия

Представлен способ локализации в массиве горных пород зон с повышенным трещинообразованием. В основу положена геофизическая модель формирования электромагнитного излучения, сопутствующего процессу нарушения сплошности в массиве. Показано, что для локализации участка с изменяемым напряженно-деформированным состоянием в окрестности выработки методом электромагнитного излучения необходимо при профилировании горной выработки оценивать мощность источника сигнала, соответствующего разрушению горных пород, путем регистрации сигналов датчиков электромагнитного излучения. Предложен подход к построению архитектуры программного обеспечения для прогнозирования динамических проявлений горного давления.

Динамические проявления горного давления, напряженно-деформированное состояние, электромагнитное излучение, натурные исследования, критерии прогноза горных ударов, модель разрушения, программно-аппаратный комплекс

DOI: 10.15372/FTPRPI20240621

EDN: INAWWE

Один из перспективных методов прогнозирования динамических проявлений горного давления основан на регистрации и интерпретации электромагнитного излучения, сопутствующего нарушению сплошности горной породы. Метод является бесконтактным, пассивным, неразрушающим, что позволяет использовать его на горнодобывающих предприятиях, где нужно оперативно локализовать зоны с опасными проявлениями горного давления. Особенно эффективен он на больших глубинах, поскольку с глубиной растет интенсивность проявлений. Известно, что развитие нарушений сплошности горных пород имеет несколько стадий: I стадия — появление микротрещин; II — формирование магистральной трещины; III — рост магистральной трещины; IV — нарушение сплошности [1–5]. В процессе разрушения горных пород наблюдается электромагнитное излучение, спектр которого на разных стадиях разрушения различается [5–9].

В лабораторных условиях установлено, что при разрушении горных пород происходит увеличение количества одиночных электромагнитных импульсов, спектр сигнала которых по мере разрушения смещается в верхнюю область частотного спектра, а затем обратно в нижнюю, но с большей энергией излучения [6–8]. Параметры электромагнитного излучения на разных стадиях разрушения зависят от минерального состава горных пород [9]. Для прогнозирования динамических проявлений горного давления на основе интерпретации параметров сигналов электромагнитного излучения, сопутствующих разрушению горных пород, существует много прогнозных критериев [2–5], но соответствующей аппаратуры для их применения нет.

В настоящей статье представлен опыт разработки такой аппаратуры для прогнозирования динамических проявлений горного давления. Приводится архитектура построения аппаратно-программных комплексов, позволяющих в автоматизированном режиме осуществлять поиск опасных участков в окрестности горной выработки, используя элементы нейросети.

С развитием радиоэлементной базы и методов программирования появилась возможность адаптировать существующие модели разрушения горных пород к созданию архитектуры аппаратно-программного комплекса прогнозирования динамических проявлений горного давления. Для этого сформированы принципы разрушения горных пород, которые заложены в основу построения нейросети, разработана модель аппаратно-программного обеспечения, учитывающего при прогнозе динамических проявлений горного давления не только сопутствующие разрушению физические процессы, но и физические свойства пород, план горной выработки, минеральный состав породы, места размещения оборудования, создающие помехо-шумовую обстановку в точке расположения измерительного оборудования. Построение аппаратно-программного комплекса по разработанной архитектуре позволит учитывать собранные и накопленные данные для всех указанных параметров, а также перейти к комплексному прогнозированию проявлений горного давления.

АРХИТЕКТУРА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Для снижения вероятности ошибки прогноза динамических проявлений горного давления и локализации опасных участков окрестности выработки методом электромагнитного излучения с учетом геологической структуры горной породы, ее водонасыщенности [10], расположения тектонических трещин, электромагнитных помех, условий залегания пород, плана выработки необходимо решать многопараметрические задачи. В [6–9] исследуются предвестники динамических проявлений горного давления, основанные на анализе амплитудных составляющих сигнала ЭМИ. Показано, что разные горные породы имеют различную способность к излучению, поэтому делать прогнозы динамического проявления, опираясь только на интенсивность излучения породы, не вполне корректно. С развитием информационных технологий прогнозирование можно возложить на вычислительную сеть. Этому должно способствовать развитие документооборота предприятия, который включает в себя регистрацию событий, планы горизонтов, маркшейдерскую информацию и пр. Электронная элементная база позволяет заложить в разрабатываемые программно-аппаратные комплексы критерии прогнозирования, причем часть программно-аппаратных комплексов размещается в аппаратуре регистрации сигналов электромагнитного излучения, а часть — в вычислительных мощностях предприятия, чтобы комплексно подходить к оценке напряженного состояния массива горных пород. Такая архитектура программно-аппаратного комплекса, состоящая из аппаратной и программной, серверной части, дает возможность комплексно подходить к прогнозированию динамических проявлений горного давления. Для автоматизации самообучающихся алгоритмов необходимо сформулировать принципы, которые закладываются в архитектуру серверного программного обеспечения, контролирующего напряженное состояние массива в окрестности горных выработок.

МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Анализ моделей разрушения позволяет сформулировать основополагающие принципы, необходимые для проведения оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород:

- “принцип подобия” — утверждает, что разрушение на микроуровне одной породы подобно разрушению этой же породы на макроуровне. Следовательно, исследование процесса разрушения с сопутствующим электромагнитным излучением можно проводить в лабораторных условиях на образцах горных пород, а результаты исследований закладывать в критерии прогноза разрушения горных пород в окрестности горных выработок;

- “принцип блочности” — горная порода рассматривается как сочетание моноблочных структур. Различные виды контактов моноблочных структур с различными физическими свойствами и минеральными составами можно параметризовать, хранить в базе данных и использовать при прогнозировании.

Сформулированные принципы позволяют при разработке критериев прогнозирования использовать данные, полученные в ходе лабораторных исследований по разрушению образцов горных пород. Хранение больших объемов в базе данных с быстрым доступом к ним дает возможность использовать комплексные критерии прогнозирования проявлений горного давления в реальном времени в составе аппаратно-программных комплексов.

Процесс разрушения горных пород включает четыре стадии (рис. 1):

- стадия I — зарождение микротрещин. Происходит образование микротрещин в объеме горной породы. Этой стадии сопутствуют одиночные импульсы при разработке регистрируемого сигнала ЭМИ;

- стадия II — слияние микротрещин. Под действием механических напряжений микротрещины начинают сливаться, образуя магистральную трещину. В структуре сигнала ЭМИ, сопутствующего процессу разрушения горной породы, наблюдается низкочастотная составляющая, характеризующая раскрытие магистральной трещины;

- стадия III — рост магистральной трещины. В электромагнитном излучении отмечаются энергетические всплески с появлением низкочастотной составляющей в спектре сигнала;

- стадия IV — нарушение сплошности. Происходит разделение породы на составные части вдоль магистральных трещин. фиксируется лавинообразное разрушение.

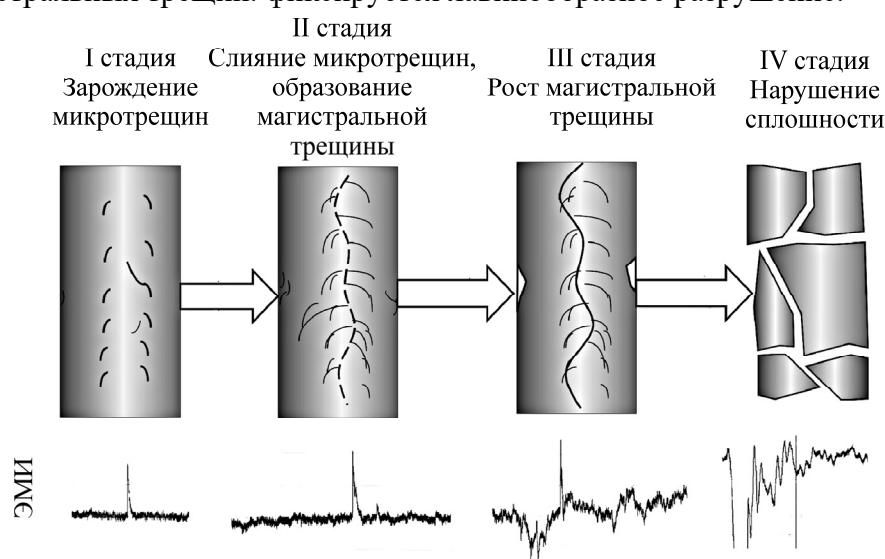


Рис. 1. Развитие трещинообразования в образце горной породы с сопутствующими сигналами электромагнитного излучения

Такая модель разрушения горных пород позволяет четко разделять стадии разрушения по наблюдаемым сигналам электромагнитного излучения. Обнаружение перехода от одной стадии к другой представлено в работе [6].

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОПАСНЫХ ЗОН В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

В [11] показано, что профилирование горной выработки позволяет находить места с повышенным трещинообразованием, которые могут привести к проявлениям горного давления в разной форме. Для определения пороговых значений электромагнитного излучения предлагается следующее расположения трещины в глубине массива (рис. 2).

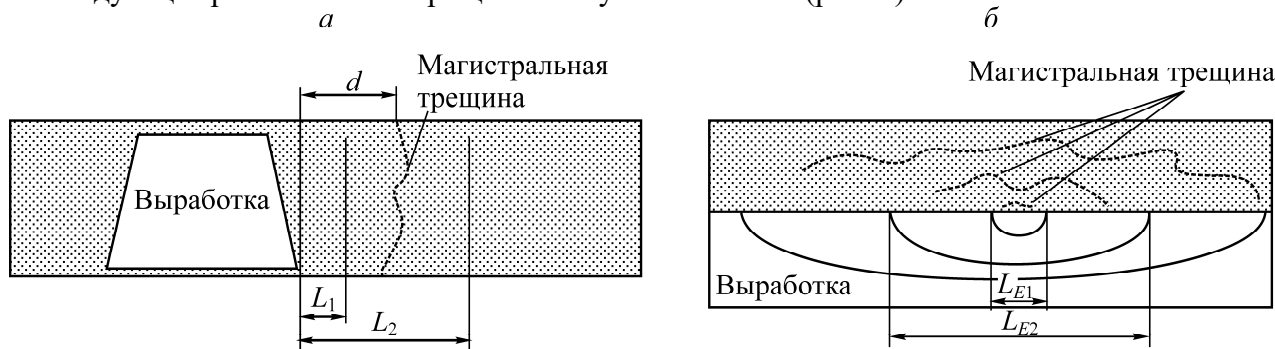


Рис. 2. Определение пороговых составляющих уровня ЭМИ, предшествующих разрушению: a — вертикальный разрез; b — вид сверху. Пояснения в тексте

На рис. 2 обозначено:

- d — расстояние от борта выработки, на котором идет процесс трещинообразования. При приближении к очагу разрушения нарастает энергия электромагнитного излучения горных пород [11]. Нарастание энергии электромагнитного излучения свидетельствует о глубине залегания магистральной трещины. Чем быстрее такое нарастание, тем ближе к борту расположена трещина и тем меньше по объему разрушение; чем глубже развитие трещины, тем больше объем обрушения;
- L_1 — глубина залегания трещины, т. е. расстояние от борта горной выработки до магистральной трещины, при росте которой происходит “шелушение” горных пород. При профилировании расстояние, на котором нарастает энергия электромагнитного излучения, обозначим как L_{E1} ;
- L_2 — расстояние от борта выработки до магистральной трещины, развитие которой приводит к горному удару. При профилировании расстояние, на котором нарастает энергия электромагнитного излучения, обозначим L_{E2} .

Таким образом, задача определения участков, на которых горное давление может проявиться в опасной форме, сводится к задаче нахождения двух параметров: E — энергия сигнала; L — протяженность участка с повышенным фоновым излучением. Если знать расстояние, на котором происходит нарастание электромагнитного фона при профилировании L_E , то задача прогноза сводится к определению глубины магистральной трещины, по которой происходит генерация сигнала ЭМИ.

Задача прогнозирования динамических проявлений горного давления методом ЭМИ на участке горной выработки решается нахождением параметров границы роста магистральных трещин, приводящих к “шелушению” (L_1) и горному удару (L_2). По показаниям регистратора электромагнитного излучения можно определять протяженность повышенного фона (L_E) при профилировании выработки и глубину, на которой растет трещина (d). Далее необходимо установить связь между критериями опасности и деформационными параметрами породы и ее способностью к излучению ЭМИ, которые можно получить в лабораторных условиях.

МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ПО СИГНАЛАМ ЭМИ

Для прогнозирования динамических проявлений горного давления существуют различные аппаратные комплексы [12, 13]. Каждый производитель такого оборудования опирается только на собственные методики, а комплекса, который бы включал разные методики прогноза и учитывал структуру горной породы, его минералогический состав, расположение тектонических разломов, пока нет. В первую очередь это связано с тем, что невозможно все критерии возложить на аппаратную часть, но можно хранить эти данные на серверах и разрабатывать программно-аппаратные комплексы. Подобные комплексы могут быть построены так, чтобы решения об опасности возлагались на аппаратуру, а оценки прогноза — на программное обеспечение оператора и сервера. Такой подход к архитектуре программного обеспечения позволяет выстраивать интеллектуальные системы, способные в полуавтоматическом режиме формировать прогноз, учитывая множество параметров. Также серверно-аппаратная архитектура может содержать многокритериальные системы прогноза и способствовать параллельному развитию смежных систем. В настоящей работе построена комплексная система, которая включает следующие части:

- регистрирующая аппаратная часть, состоящая из регистратора электромагнитного излучения, функция которого — регистрировать, накапливать и передавать сигналы ЭМИ, а также определять местоположение регистрации, проводить вычисления, прогнозируя динамические проявления горного давления, выдавать прогноз на экран дисплея и передавать результаты вычисления на сервер. Изготавливается как в стационарном, так и в мобильном виде;
- программная часть оператора (рис. 3) служит для исследования и анализа пород, определения спектральных характеристик сигнала, полученного аппаратурой сбора, хранения, передачи данных и первичного анализа. Выполняет определение деформационных характеристик образцов горных пород, а также излучательной способности породы, сопутствующей изменению НДС, вносит эти характеристики в базу данных с записью места взятия образца.

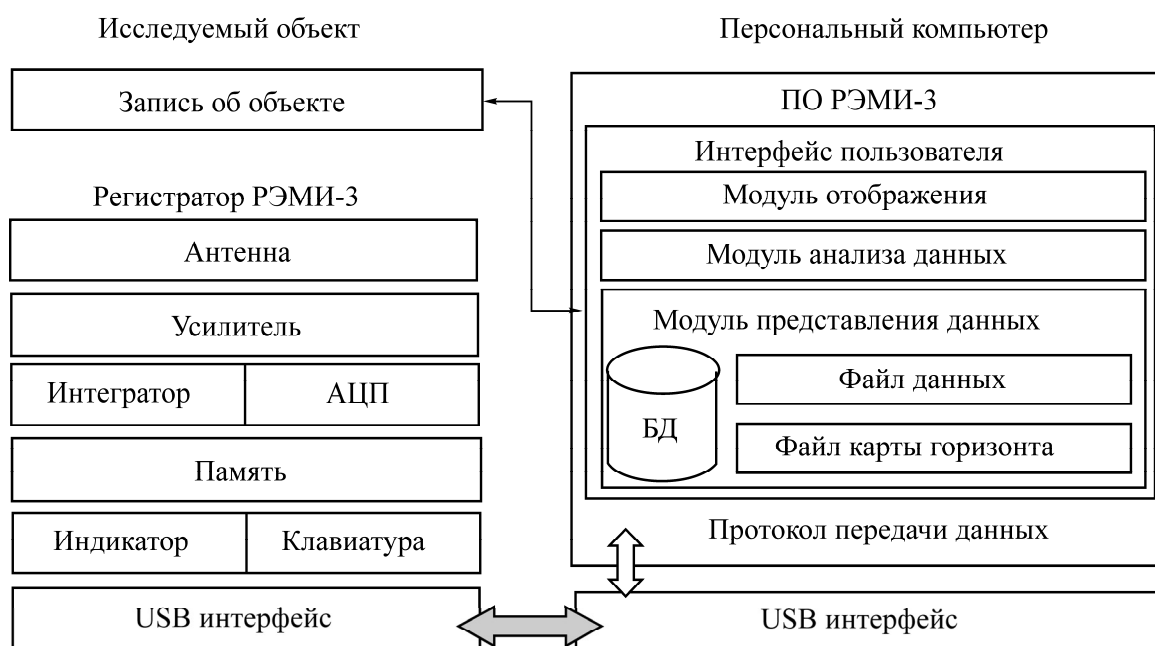


Рис. 3. Архитектура программного обеспечения для исследования, анализа и передачи данных на сервер

Серверная программная часть (рис. 4) служит для сбора и хранения данных о расположении объектов контроля на горнодобывающем предприятии, сведений об образцах и их деформационных характеристиках, способности породы к электромагнитному излучению при разрушении, а также о структуре породы, карты выработок, истории динамических проявлений на предприятии. Кроме того, задача серверной части — расчет и принятие решений об опасных участках с выдачей результатов вычислений оператору и интеграцией в систему объективного контроля и мониторинга на предприятии.

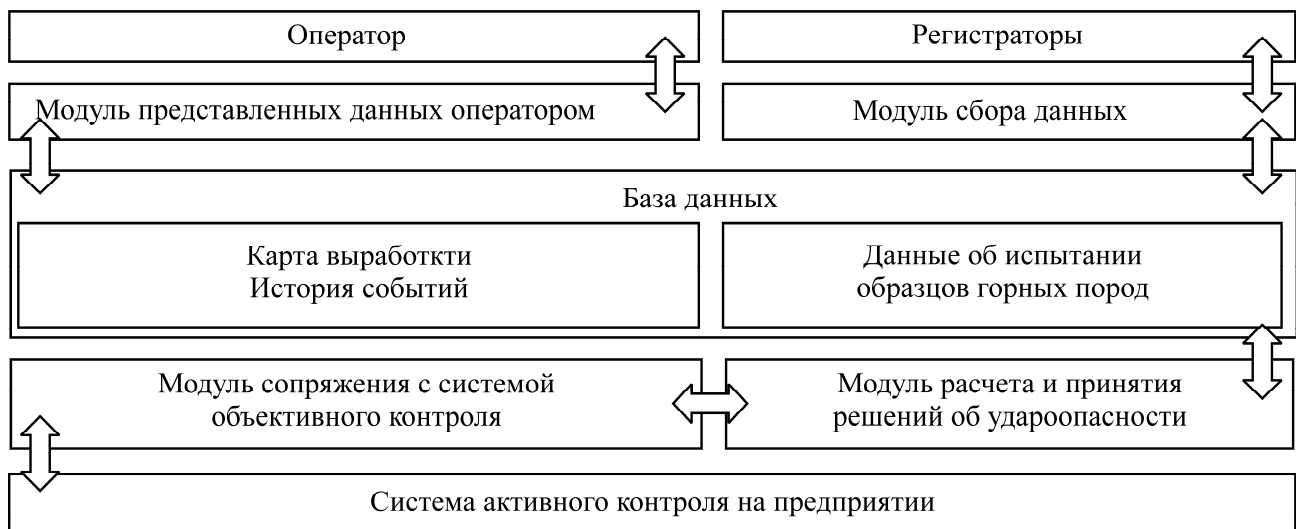


Рис. 4. Архитектура серверной части программного обеспечения для сбора, хранения данных и автоматизированного контроля

Такая разработка архитектуры серверной части программного обеспечения позволяет выстраивать модули искусственного интеллектуального анализа, опираться на историю динамических проявлений горного давления на предприятии, интегрироваться в существующие системы объективного контроля и реализованные на предприятии системы мониторинга прогнозирования горных ударов.

Для принятия решений об опасности проявления горного давления на участке горной выработки используется следующая архитектура (рис. 5), где вектор $\bar{X} = \{x_1, x_2, x_3, \dots x_N\}$ представляет набор входных параметров с весовыми коэффициентами $\bar{W} = \{w_1, w_2, w_3, \dots w_N\}$, заложенными в оценку НДС участка массива и нормированными к единице.

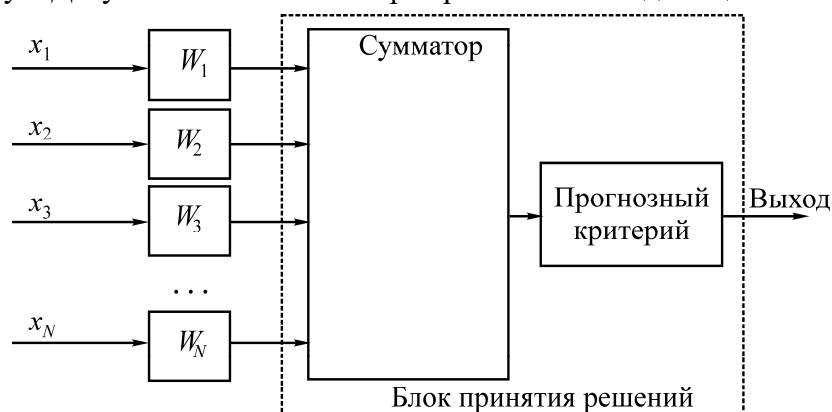


Рис. 4. Архитектура модуля принятия решения об опасности на участке

К таким входным данным относятся: способность горной породы к излучению; предел прочности горной породы на наблюдаемом участке; обводненность участка; наличие тектонических разломов; наличие сопряжения различных горных пород и пр.

ВЫВОДЫ

Представлен способ локализации в массиве горных пород с повышенным трещинообразованием, адаптированный к аппаратно-программной инфраструктуре горнодобывающих предприятий. Методика прогнозирования динамических проявлений горного давления включает:

- модель разрушения горных пород с адаптацией к методу прогнозирования динамических проявлений горного давления по сигналам электромагнитного излучения;
- методику локализации участков выработки с повышенным трещинообразованием, учитывающую глубину формирования магистральной трещины. Методика использует только физические характеристики породы, которые можно определить в лабораторных условиях на образцах горных пород;
- архитектуру системы прогнозирования горных ударов, учитывающую как текущие измерения параметров сигналов ЭМИ, сопутствующих обрушению горных пород, так и факторы, которые влияют на точность прогноза — обводненность участка, структура горной породы;
- архитектуру программно-аппаратного обеспечения, позволяющего в автоматическом режиме внести оценку напряженного состояния массива в окрестности горной выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев Г. А., Демин В. М. Кинетика электромагнитного и акустического излучений как предвестник неустойчивости контактов блоков // Докл. АН СССР. — 1988. — Т. 303. — № 4. — С. 834–836.
2. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестн. АН СССР. — 1968. — № 3. — С. 46–52.
3. Панин В. Е., Лихачев В. А., Гриняев Ю. В. Структурные уровни деформации твердых тел. — Новосибирск: Наука, 1985. — 229 с.
4. Опарин В. Н., Акинин А. А., Востриков В. И., Юшкин В. Ф. Нелинейные деформационно-волновые процессы в окрестности выработок // ФТПРПИ. — 2003. — №4. — С. 3–18.
5. Иванов В. В., Егоров А. А., Колпакова Л. А., Пимонов А. Г. Динамика трещин и электромагнитное излучение горных пород // ФТПРПИ. — 1988. — № 5. — С. 20–27.
6. Вострецов А. Г., Бизяев А. А. Обнаружение изменения свойств нестационарного пуассоновского потока импульсов неизвестной интенсивности. // Науч. вестн. НГТУ. — 2008. — № 3 (32) — С. 37–44.
7. Алексеев Д. В., Егоров П. В., Иванов В. В. и др. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород // ФТПРПИ. — 1993. — № 5. — С. 27–31.
8. Курленя М. В., Вострецов А. Г., Яковицкая Г. Е. Об одной модели сигналов электромагнитного излучения нагруженных горных пород // ФТПРПИ. — 1996. — № 3. — С. 9–17
9. Бизяев А. А., Вострецов А. Г., Смирнягин И. И., Шарапова М. Д. Анализ электромагнитного излучения, сопутствующего разрушению образцов горных пород // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 185–191

- 10. Еременко А. А., Дарбинян Т. П., Шапошник Ю. Н., Усольцева О. М., Цой П. А.** Оценка физико-механических свойств руд и горных пород, подвергшихся затоплению // ФТПРПИ. — 2023. — № 5. — С. 24–31
- 11. Бизяев А. А., Цупов М. Н., Савченко А. В., Воронкина Н. М.** Методика бесконтактного определения опасно нагруженных зон в массиве горной выработки // Уголь. — 2019. — № 11 (1124). — С. 27–31
- 12. Бизяев А. А., Вострецов А. Г., Яковицкая Г. Е.** Регистрационно-диагностический комплекс РДК РЭМИ-3 и экспериментальные исследования разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок Таштагольского месторождения // Докл. АН высш. шк. РФ. — 2015. — № 3 (28). — С. 29–38.
- 13. Вострецов А. Г., Кривецкий А. В., Бизяев А. А., Яковицкая Г. Е.** Аппаратура регистрации сигналов ЭМИ в условиях подземных горных выработок // ФТПРПИ. — 2008. — №2. — С. 115–122.

Поступила в редакцию 01/X 2024

После доработки 05/XI 2024

Принята к публикации 08/XI 2024