

УДК 622.83.001

ПРОБЛЕМЫ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИНТЕРПРЕТАЦИЮ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Бессарабова А.А., студентка гр. ГПс-251, I курс
Научный руководитель: Фомин А.И., д.т.н, профессор
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева г. Кемерово

Актуальность исследования

Исследование сложностей интерпретации данных геомеханического мониторинга методом акустической эмиссии (далее АЭ) в условиях горных выработок является актуальным по нескольким причинам.

Во-первых, метод АЭ признан одним из наиболее информативных и оперативных инструментов контроля напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и прогноза удароопасности, однако его практическое применение ограничено как раз интерпретационными проблемами, связанными с неоднородностью массива, техногенными помехами и эффектами памяти параметров сигналов.

Во-вторых, рост глубин и интенсивности горных работ усиливает геодинамические риски, что требует повышения надёжности систем раннего предупреждения, основанных на АЭ-мониторинге, и, следовательно, более глубокого понимания факторов, искажающих регистрируемые сигналы.

Кроме того, развитие современной измерительной аппаратуры и вычислительных технологий делает возможной сложную цифровую обработку больших массивов АЭ-данных (фильтрацию, классификацию, построение карт акустической активности, применение методов машинного обучения), но эффективность этих подходов напрямую зависит от корректной физической интерпретации параметров АЭ и учёта источников ошибок.

Поэтому исследование факторов, влияющих на достоверность локализации и идентификации источников АЭ, а также разработка методик повышения точности интерпретации являются необходимым условием для создания надёжных геомеханических систем мониторинга и снижения риска опасных геодинамических проявлений в горных выработках [1].

Метод акустической эмиссии

Принцип метода: принцип метода акустической эмиссии заключается в регистрации упругих волн, возникающих в материале при его нагружении, деформации и разрушении. Эти волны распространяются в среде и могут быть зарегистрированы специальными датчиками, размещёнными на поверхности исследуемого объекта или в точках контакта с ним [2].

Сигналы акустической эмиссии характеризуются рядом параметров, включая:

- амплитуду сигнала;
- длительность импульса;
- частотный спектр;
- энергию акустического события [3].

Анализ этих параметров позволяет исследовать динамику разрушения горных пород и оценивать стадии развития дефектов в нагруженном массиве.

Оборудование: для регистрации акустической эмиссии в горных выработках применяются специальные датчики, преобразующие механические колебания массива в электрический сигнал. На практике используют, как правило, пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии, подключённые к предварительным усилителям и системам регистрации; в некоторых сейсмоакустических комплексах применяются также геофоны, работающие в соответствующем частотном диапазоне.

Зарегистрированные сигналы поступают на измерительную аппаратуру, где они усиливаются, фильтруются, оцифровываются и записываются для последующего анализа.

В системах мониторинга используется сеть датчиков, что позволяет определять координаты источников акустической эмиссии по временам прихода сигналов на разные приёмники с учётом модели скоростей распространения волн в породном массиве.

Обработка данных: после регистрации сигналы акустической эмиссии подвергаются цифровой обработке. Обработка включает:

- фильтрацию шумов;
- выделение отдельных событий акустической эмиссии;
- определение параметров сигналов;
- анализ пространственного распределения источников [4].

На основе анализа распределения источников акустической эмиссии строятся карты акустической активности, позволяющие выявлять зоны повышенной деформации и разрушения в массиве горных пород. Такие данные используются для оценки напряжённо-деформированного состояния массива и прогноза опасных геодинамических процессов [5].

Факторы, влияющие на интерпретацию данных

Техногенные помехи. Одним из основных факторов, осложняющих интерпретацию данных акустической эмиссии в горных выработках, являются техногенные помехи. В условиях ведения горных работ значительное количество акустических сигналов возникает при бурении, взрывных работах, работе горнотранспортного и вспомогательного оборудования, а также при выполнении других технологических операций.

Эти сигналы накладываются на полезные импульсы естественной акустической эмиссии породного массива, затрудняя их идентификацию и количественный анализ. Поэтому при интерпретации данных АЭ необходимы специальные методы фильтрации техногенных шумов и классификации сигналов, позволяющие отделять технологические воздействия от сигналов, связанных с развитием трещиноватости и опасных геодинамических процессов [6].

Структурные особенности массива. Геологическое строение массива горных пород существенно влияет на распространение акустических волн. Наличие трещин, тектонических нарушений, зон дробления и разуплотнения приводит к изменению скорости распространения упругих волн, усилению рассеяния и затухания энергии. В структурно неоднородной среде скорость распространения волн отличается в различных участках массива и по разным направлениям, что приводит к отклонению реальных времён прихода сигналов от расчётных для упрощённой однородной модели и, как следствие, к ошибкам при определении координат источников акустической эмиссии [7].

Невоспроизводимость параметров акустической эмиссии (АЭ). В экспериментах по разрушению горных пород она связана с эффектом Кайзера — явлением, при котором при циклическом нагружении активность и параметры АЭ в последующем цикле остаются близкими к фоновым и не воспроизводятся вплоть до достижения максимального напряжения предшествующего цикла; при превышении этого уровня интенсивность АЭ резко возрастает. В современной литературе этот эффект часто рассматривают как акустико-эмиссионный эффект памяти (АЭЭП), поскольку по изменению характеристик АЭ в повторных циклах нагружения становится возможным восстановить информацию о ранее испытанных напряжениях. Также параметры АЭ изменяются по мере развития микротрещин в образцах пород, что приводит к тому, что параметры сигналов могут существенно отличаться на разных стадиях нагружения. Это усложняет интерпретацию результатов мониторинга, так как изменение параметров АЭ часто используется для диагностики стадий разрушения [8].

Ошибки интерпретации

Ошибочная локация источников. Погрешности в измерении времени поступления сигнала на преобразователи — один из источников погрешностей при определении координат источников акустической эмиссии (АЭ) методом разности времени прихода сигналов. Эти ошибки могут привести к значительным ошибкам, так как точность расчёта координат зависит от точности измерения времени прихода сигналов [9].

Ложные срабатывания. При регистрации АЭ возможно появление ложных событий из-за внешних шумов или технических особенностей аппаратуры. Для уменьшения количества таких событий используются методы

фильтрации сигналов и алгоритмы обработки данных, а также регламентируются требования к помехоустойчивости аппаратуры [10].

Искажение результатов. Естественные и искусственные неоднородности в массиве горных пород могут приводить к искажению распространяющихся акустических волн. Это может изменять форму, амплитуду и длительность зарегистрированных сигналов, что влияет на точность интерпретации результатов.

Искажения возникают из-за рассеяния акустической энергии на неоднородностях породы, а также из-за отражения волн на границах сред с различными акустическими свойствами [11].

Вывод

Метод акустической эмиссии является эффективным инструментом для оценки напряжённо-деформированного состояния массива горных пород и прогноза опасных геодинамических процессов, однако его применение в реальных условиях горных выработок сопряжено со значительными трудностями интерпретации данных.

Ключевые проблемы включают техногенные помехи от горных работ, влияющие на качество регистрации полезных сигналов, структурную неоднородность массива, приводящую к ошибкам локации источников из-за изменения скоростей распространения волн, а также эффекты памяти (эффект Кайзера) и эволюцию параметров АЭ на разных стадиях деформации, усложняющие диагностику стадий разрушения. Технические ограничения — погрешности измерения времени прихода сигналов, ложные срабатывания и искажения волн на неоднородностях — дополнительно снижают достоверность результатов.

Для повышения надёжности интерпретации необходим комплексный подход: калибровка скоростных моделей массива, разработка адаптивных алгоритмов фильтрации и классификации сигналов с использованием методов машинного обучения, а также интеграция данных АЭ с результатами деформационного и микросейсмического мониторинга в единую геомеханическую модель. Только такая увязка позволит минимизировать систематические ошибки и обеспечить эффективное прогнозирование удароопасности при ведении горных работ.

Список литературы:

1. Харитонов К. О., Чье Ен Ун, Калинов Г. А. Методы обнаружения импульсов акустической эмиссии в задачах геомеханического мониторинга // КиберЛенинка : научная электронная библиотека. 2013. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16581>.
2. Жуков В. С., Смирнов А. Б. Акустико-эмиссионный мониторинг геодинамических процессов в земной коре // Физика Земли. 2020. № 4. С. 112–120.

URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=fizzemli&y=2020&v=0&n=4&a=FizZemli2004010Zhukov>.

3. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Лебедев Е. Ю. Применение акустико-эмиссионного метода для диагностики мостовых конструкций // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 5. С. 129–135. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2018/5/129_135_5_2018.pdf.

4. Патент № 2570592 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/14. Способ регистрации и анализа сигналов акустической эмиссии : № 2014123217/28 : заявл. 05.06.2014 : опубл. 10.12.2015 / А. Н. Кузьмин, Д. Г. Давыдова, В. А. Кац [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Стратегия НК".

5. Жуков А. С., Кузьмин А. Н., Шипов Д. В. Методика оценки напряженно-деформированного состояния магистральных нефтепроводов по данным акустико-эмиссионного контроля // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 618–624. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16581>.

6. Махмудов Х. Ф., Афанасьев П. И. Фильтрация техногенных помех при акустико-эмиссионном мониторинге // КиберЛенинка : научная электронная библиотека. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/filtratsiya-tehnogennyh-pomeh-pri-akustiko-emissionnom-monitoringe>.

7. Жуков В. С., Смирнов А. Б. Акустико-эмиссионный мониторинг геодинамических процессов в земной коре // Физика Земли. 2020. № 4. С. 112–120. URL: <https://sciencejournals.ru/view-article/?j=fizzemli&y=2020&v=0&n=4&a=FizZemli2004010Zhukov>.

8. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Лебедев Е. Ю. Применение акустико-эмиссионного метода для диагностики мостовых конструкций // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № 5. С. 129–135. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2018/5/129_135_5_2018.pdf.

9. Российская Федерация. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. Приказ от 5 ноября 2015 г. № 385 рб «О порядке проведения акустико-эмиссионного контроля». Москва, 2015.

10. Кузьмин А. Н., Иноземцев В. В., Прохоровский А. С., Аксельрод Е. Г., Кац В. А. Технология беспороговой регистрации данных акустической эмиссии при контроле промышленных объектов // Химическая техника. 2018. № 3. С. 32–37. URL: <https://chemtech.ru/tehnologija-besporogovoj-registracii-dannyh-akusticheskoy-jemissii-pri-kontrole-promyshlennyh-obektov/>.

11. Хмелинин А. П. Разработка комплексного геофизического метода для выбора места заложения скважин геомеханических измерений и контроля процесса их бурения : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.16. Новосибирск, 2014. 162 с. URL: https://science.kuzstu.ru/wp-content/docs/OAD/Soresearchers/2014/Hmelinin/dissertation_Hmelinin.pdf.