

УДК 622.831.325

**А.Ю. Искра, И.Ю. Рассказов**

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ ГЕОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

*Рассмотрены основные особенности распространения в горном массиве АЭ импульсов, выявленные по результатам геоакустического мониторинга в условиях действующих горнодобывающих предприятий. Для повышения эффективности геоакустического контроля предложено использовать методические подходы, базирующиеся на пространственно-временном и спектральном анализе данных.*

*Ключевые слова: геомеханика, геоакустический мониторинг, рудное поле, геоблок, локационные группы.*

**Семинар № 12**

### **A.U. Iskra, I.Y. Rasskazov THE PECULIARITIES OF THE SPATI-TEMPORAL AND SPECTRAL ANALYSIS OF THE GEO-ACOUSTIC MONITORING DATA**

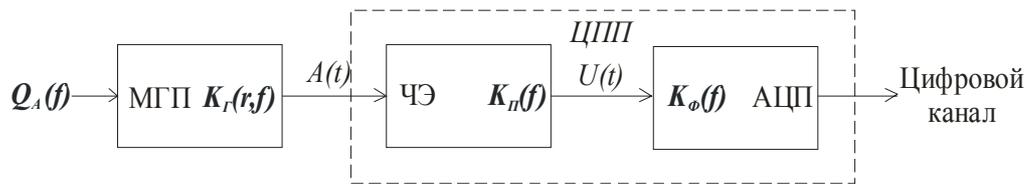
*The main peculiarities of the acoustic emission impulse distribution in the rock mass are reviewed. The peculiarities were defined as the result of the geo-acoustic monitoring in the conditions of the operating mining enterprise. To enhance the effectiveness of the geo-acoustic control the methodical approaches were proposed. The approaches are based on the spati-temporal and spectral analysis of the data.*

*Key words: geomechanics, geo-acoustic monitoring, ore field, geoblock, location groups.*

**Д**ля эффективного контроля и управления горным давлением необходимы современные методы и технические средства, обеспечивающие надежную регистрацию и оперативную обработку информации о геомеханическом состоянии массива горных пород. Одним из индикаторов состояния горного массива являются его акустическая активность, проявляющаяся при деформациях на

стадиях близких к разрушению материала [1, 2].

В ИГД ДВО РАН разработана и введена в эксплуатацию на урановом руднике "Глубокий" цифровая автоматизированная геоакустическая система геомеханического мониторинга система АСКГД "Prognoz ADS", которая характеризуется высокой скоростью обмена данными в многоканальном режиме (не менее 8), измерением большого числа параметров регистрируемых сигналов акустической эмиссии (АЭ) и повышенной помехозащищенностью [3, 4]. Разработанный измерительно-вычислительный комплекс позволяет в круглосуточном режиме в условиях действующего горнодобывающего предприятия получать по помехоустойчивым цифровым каналам и сохранять в базе данных (БД) оперативную многопараметрическую информацию о регистрируемых акустических событиях, выполнять пространственно-временной анализ и мониторинг акустически активных зон в массиве горных пород (МГП).



**Рис. 1. Электронная блок-схема реального акусто-электрического тракта в процессе регистрации АЭ-импульсов ( $Q_A(f)$  – частотный спектр излучения по смещению в источнике АЭ, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь)**

Основными элементами системы являются устанавливаемых в подземных горных выработках цифровые приемные преобразователи (приемники акустических сигналов), состоящие из двух элементов: первичного преобразователя с чувствительным элементом акселерометрического типа (ЧЭ) и блока цифровой обработки акустических сигналов. Цифровые приемные преобразователи (ЦПП) обеспечивают регистрацию импульсных сигналов от источников АЭ с энергией выше 1 Дж. Эквивалентная электронная блок-схема сквозного акустоэлектрического тракта в процессе регистрации импульсов приведена на рис. 1.

Величину сигнального числового кода  $V_i$  на выходе ЦПП можно представить в виде:

$$V_i = U(t_i) \cdot K_n(f) \cdot K_\phi(f), \quad (1)$$

где  $U(t_i)$  – напряжение на выходе ЧЭ в дискретный момент времени  $t_i$ ;  $K_n(f)$  – коэффициент акусто-электрического преобразования ЧЭ по ускорению на частоте  $f$ , Гц;  $K_\phi(f)$  – частотно-зависимый коэффициент пропускания полосового фильтра (его амплитудно-частотная характеристика – АЧХ).

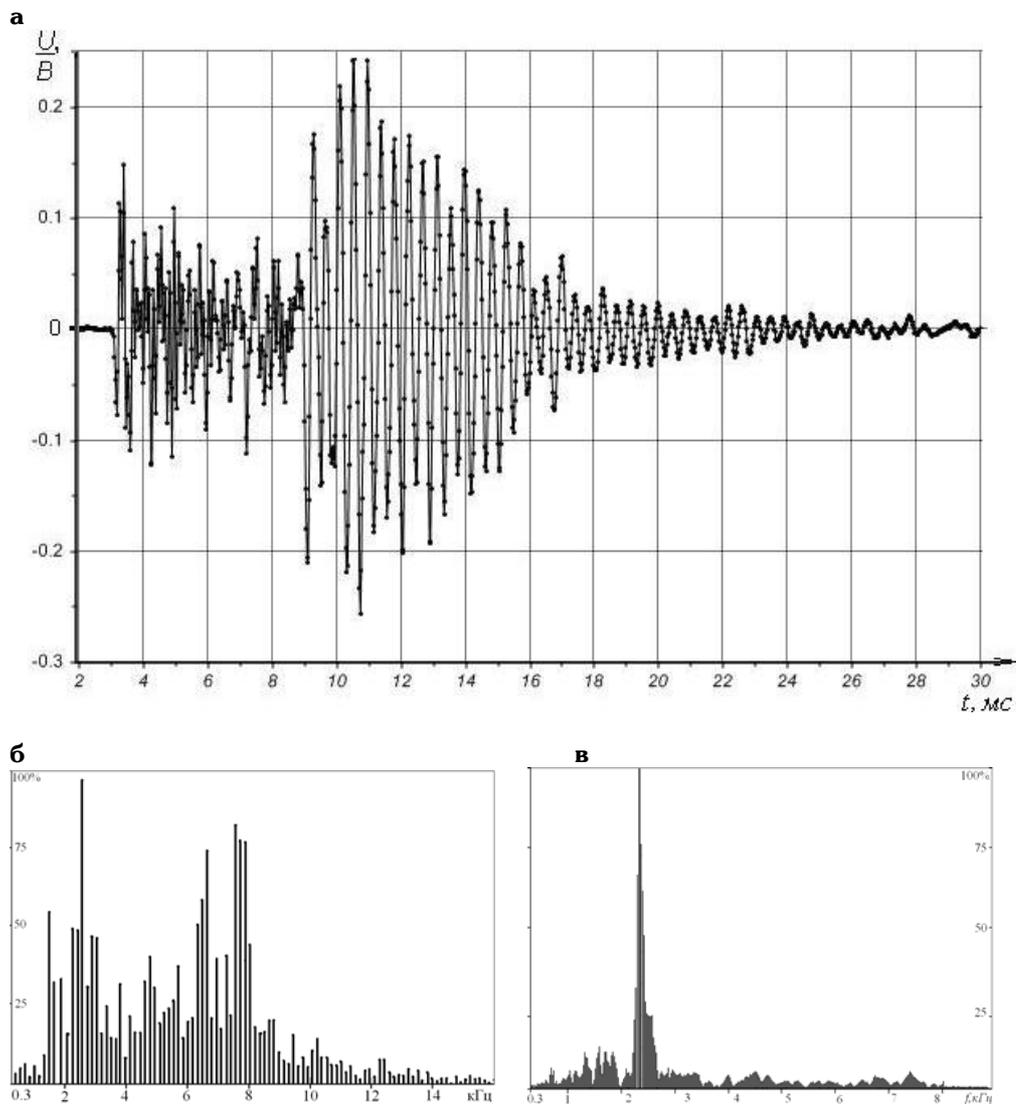
В свою очередь  $U(t_i)$  может быть представлено в виде результата обратного преобразования Фурье от спектрального разложения  $S(f, r)$  цуга

упругих волн [5] в точке приема на расстоянии  $r$  от источника АЭ в предположении, что геосреда (массив горных пород) является изотропным:

$$S(f, r) = Q(f) \cdot K_z(f, r) = Q(f) \cdot e^{-\alpha(f)r}, \quad (2)$$

где  $Q(f)$  – спектр излучения в источнике АЭ (по смещению) на частоте  $f$ ;  $K_z(f, r)$  – параметр фильтрации гармоник спектра в массиве горных пород на длине пробега  $r$ , м;  $\alpha(f)$  – коэффициент поглощения гармоник излученного спектра с частотой  $f$  в массиве горных пород.

Как видно из (2), слой массива горных пород, преодолеваемый упругим импульсом, оказывает фильтрующее воздействие на сигнал, аналогичный эффекту электронного НЧ-фильтра, при котором значение коэффициента поглощения нелинейно растет с ростом частоты. Отметим также, что полосовой фильтр перед АЦП необходим для подавления уровня помеховых низкочастотных технологических шумов в зоне контроля и ликвидации в преобразуемом сигнале ВЧ-компонент свыше 20 кГц. Совместное действие этих последовательных фильтров приводит к снижению резкости (крутизны) фронта электрического импульса и точности определения момента прихода волны на наиболее удаленные от источника АЭ геофоны. Следует отметить, что в НЧ-диапазоне частот (десятки и сотни герц) породный мас-



**Рис. 2. Типовые характеристики естественных источников АЭ в породном массиве:** а – вид естественного АЭ-импульса, б – спектр начального сегмента сигналаграммы (для первых 256 точек), в – спектр основной части импульса (следующие 1024 точки)

сив акустически весьма прозрачен, что приводит в каждом ЦПП к регистрации массы шумовых импульсных флуктуаций различного происхождения, которые необходимо программно дискриминировать, то есть отделить от полезных сигналов и удалить из БД.

Остановимся подробнее на эффективных технологиях селекции полезных АЭ-импульсов, учитывающих особенности формирования сигнальных откликов в типовых геофонах-акселерометрах и влияния акустического канала и электронных трактов регистрации сигналов естественной

АЭ. Сохранение в БД регистрируемых в процессе мониторинга достаточно представительных по длительности (до 50 мс) сигнальных импульсных реализаций (цифровых сигналограмм) позволяет производить детальный анализ их структуры и частотных свойств импульсов.

На рис. 2 приведена типовая сигналограмма естественного АЭ-импульса, генерированного массивом горных пород при хрупком микроразрушении (трещинообразовании). Ее визуальный анализ позволяет выделить начальную более высокочастотную часть (длительностью около 6 мс) со спадающей огибающей, за которой следует энергетически более весомая часть импульса с преобладающими частотами спектра 2300–500 Гц.

Превалирующие для *p*-типа волн (в первые 6 мс) частоты гармоник со значениями около 6500 и 7400 Гц, как это видно из приведенных энергетических спектрограмм для каждого из сегментов импульса, сменяются вторым фронтом (*s*-типа) и монотонно затухающими после 11-й миллисекунды колебаниями, близкими по частоте к собственному резонансу ЧЭ.

Таким образом, вполне различимое наличие средне- и высокочастотных (выше 10 кГц) спектральных компонент в сигналограмме, является характерным признаком естественной АЭ, регистрируемой в ближней зоне от источника АЭ (не превышающей десятки метров пробега импульса в массиве горных пород). Импульсы, почти не содержащие таких частотных компонент, нельзя однозначно отождествлять с хрупким разрушением горных пород. Как известно, более протяженные дефекты формируются в виде быстрой последовательности скооперированных микроразрушений (проистекающей в пределах долей секунды), поэтому и

мощные естественные АЭ-источники закономерно излучают частоты выше 3,5 кГц с относительной долей энергии импульса в них не менее 10 %. Снижение этого показателя до нескольких процентов свидетельствует либо о помехах, либо об удалении источника АЭ от точки приема в сотни метров и более (для естественных источников АЭ).

На ближайших к АЭ-источнику геофонах наблюдается вариант сигналограммы, схожий с представленным на рис. 2, а, где виден первоначальный приход “продольных волн” *p*-типа, за которыми следует четкий фронт “поперечных волн” (*s*-типа). У последних видимая частота заметно ниже, так же как и скорость распространения (меньше в 1,4-1,5 раза в сравнении с волнами *p*-типа). Различные типы волн указывают на преобладающий характер колебаний частиц породы в точке регистрации, поскольку в реальной анизотропной среде поперечных волн в чистом виде, как правило, не возникает [5]. На рис. 2,б представлен основной спектр “продольного”, а на рис. 2,в – “поперечного” волнового цугов. После пробега дистанции порядка 50-80 м четкость (относительная крутизна) фронтов обеих мод упругих колебаний монотонно снижается, а временной интервал (сдвиг) между ними пропорционально возрастает. Измеренная величина временного сдвига может быть использована при выборке импульсов для локации в качестве селективного признака (из тех, где такое измерение возможно).

Отметим, что наиболее продуктивной моделью описания пространственного распространения волнового пакета от неизвестного источника АЭ с энергией до 100 Дж является сферический волновой фронт. Для уточнения модели фронта (например, ис-

пользуя его эллипсоидное описание) требуется изучение детальной картины скоростной анизотропии внутри антенной системы и вблизи нее.

У источников АЭ, равномерно окруженных системой геофонов, как, например, на рис. 3, отношения длин пробега упругих волн до различных геофонов в большинстве случаев характеризуются усредненным показателем  $\gamma \approx 3$ . Элементарный стереометрический анализ показывает, что при приближении АЭ-источника к одному из геофонов отношение указанных длин (конечных акустических лучей до наиболее удаленных ЧЭ) к минимальной дистанции может приближаться к нескольким десяткам. Однако соответствующее многократное снижение плотности потока энергии упругих волн, согласно нижеприведенной зависимости (3), для наиболее удаленных геофонов заметно снижает вероятность регистрации ими ослабленных импульсов. Ослабление регистрируемой плотности потока энергии для компоненты с частотой  $f$  в излученном волновом пакете (при сферической модели излучения в изотропной среде) на расстоянии  $r$  от источника АЭ для сплошных сред описывается известным соотношением [5]:

$$\varepsilon(r, f) = \frac{\varepsilon_0(f) \cdot e^{-\beta(f) \cdot r}}{r^2} \approx \frac{\varepsilon_0(f)}{r^2} \quad (3)$$

(при  $r < 100$ ,  $f < 10^4$ ),

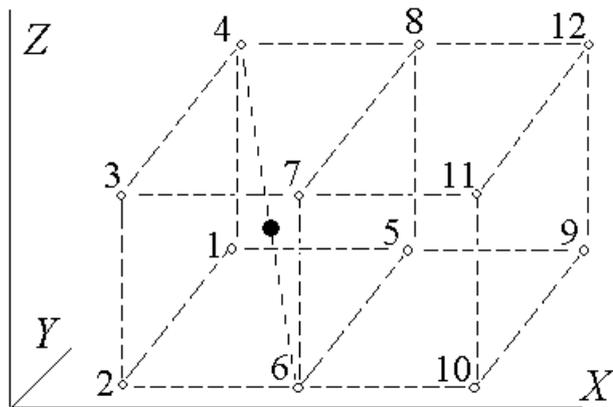
где  $\varepsilon_0(f)$  – плотность потока энергии компоненты с частотой  $f$ , Гц на единичном расстоянии от центра источника АЭ.

Зависимость коэффициента поглощения горных пород  $\alpha(f)$  от частоты колебаний для различных типов горных пород в различных интервалах излучаемого диапазона частот (десятки герц и десятки килгерц) не имеет универсального аналитического

описания, но на первой сотне метров пробега при  $f < 10^4$  Гц соответствующий экспоненциальный множитель в (3) близок к единице, поэтому  $(r_i/r_j)^2 \approx \varepsilon_j/\varepsilon_i$  (индексы  $i$  и  $j$  соответствуют разным геофонам).

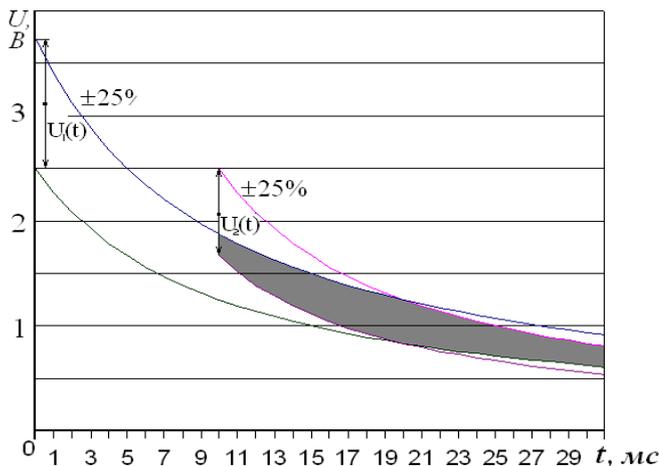
Значительное влияние на регистрируемые амплитуды АЭ-сигнала (вариации до  $\pm 50\%$ ) и их интегральные характеристики (сигнатуры, вычисляемые во временном окне) оказывают качество акустического контакта с массивом горных пород при установке геофонов и различная ориентация фронта приходящего АЭ-импульса к оси ЧЭ (влияние его пространственной диаграммы чувствительности на амплитуду сигнала).

Основные количественные и качественные сопоставления различий сигналов АЭ произведем для наиболее просто реализуемой симметричной конфигурации антенного поля геофонов с малым числом разнесенных ЧЭ (12 шт.), установленных по вершинам двух пространственных областей кубической формы с ребром  $2l = 60$  м, сопряженных по 1 грани (см. рис. 3). Пусть для определенности фактическое отношение усредненных значений скоростей продольных и поперечных волн  $V_p/V_s = 5500/3055 = 1,8$ . Представим, что квазисферический источник АЭ размером 1 м находится в центре куба 1-2-3-4-5-6-7-8, как показано на рис. 3. Пусть указанный источник АЭ равномерно во всех направлениях излучил объемную упругую волну длительностью  $\tau_{ii} \approx 15$  мс. При указанном различии скоростей  $p$ - и  $s$ -типа соответствующие им фронты сигналаграммы  $U_i(t)$  на ближайших геофонах будут разделены во времени на  $\Delta t = 52 \cdot (1/3055 - 1/5500) = 7,57$  мс, а на ЧЭ геофонов 9-12 – на 14,5 мс, что уже очень близко к длительности  $\tau_{ii}$ .



○ – геофоны, ● – область источников

Распространение фронта импульса, согласно (3), будет сопровождаться убыванием измеренных амплитуд обратно-пропорционально  $r$  (м). Соответствующая зависимость  $U_1(t)$  приведена на рис. 4, с отображением обеспеченных на практике границ вариаций результатов измерений и одинаковым допуском разброса значений  $\pm 25\%$  от нормы, заданной моделью распространения упругих волн (т. е. в этих пределах окажется разброс результатов измерений амплитуд в равноудаленных от источника АЭ геофонах 1, 2, 3..., 8).



232

**Рис. 3. Простая конфигурация антенной системы геофонов**

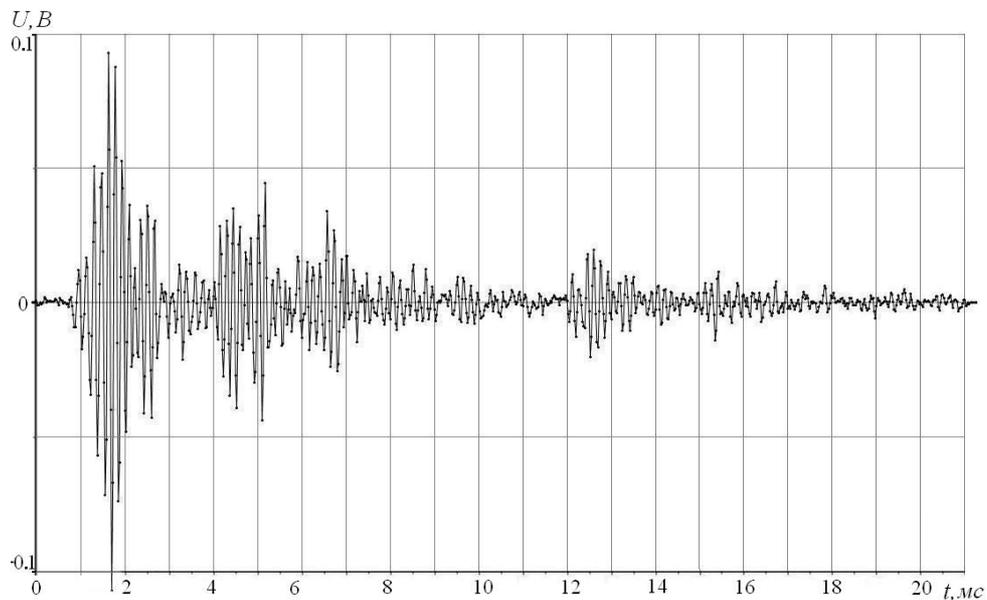
Представив аналогичный малый источник АЭ с отклонением его центра от первого в пределах 5 м (энергия второго АЭ-события меньше первого в 1,5 раза) и временным запаздыванием к первому около 10 мс, получим для него на совмещенном графике вторую полосу возможных отсчетов амплитуд

$U_2(t)$ , которая на значительном временном интервале пересекается с первой (затушеванная область на рис. 4), т.е. амплитудная дифференциация одно-типных импульсов в данном случае на геофонах 1-8 системы станет невозможной, а полное разделение типов волн на геофонах 9-12 усугубит проблему для идентификации их каждого волнового всплеска, принятого ЦПП.

Следовательно, программная процедура корректной компоновки соответствующих наборов данных (выборка однородных импульсов для локализации каждого источника АЭ) из нескольких десятков зарегистрированных импульсов, должна задействовать дополнительные надежные селективные признаки выделения полезных сигналов и выбраковки различного рода помех.

К таким селективным признакам полезного сигнала импульсов относятся:

**Рис. 4. Графики затухания амплитуд регистрируемых АЭ-импульсов**



**Рис. 5. Сигналограмма АЭ-импульса от близкорасположенной трещины**

- длительность и “треугольная” форма огибающей полезного импульса (время спада должно превышать длительность фронта);
- явно определяемый фронт с длительностью не более 10 мс;
- совпадающее или близкое количество экстремумов на огибающих импульсов;
- высокая корреляция спектрограмм однородных импульсов, т. е. близость спектров АЭ-импульсов, порожденных одним источником.

Отсутствие в рассчитанном спектре сигналограммы частотных компонент выше 4 кГц (на которые суммарно приходится менее 8% суммарной энергии импульса) позволяет отнести АЭ-импульс к помеховым. К такому же классу импульсов относятся слабые естественные источники АЭ вблизи геофона (в радиусе до 20 м геофон обладает повышенной чувствительностью, регистрируя даже те микродефекты, импульсы от которых не могут обнаруживаться на удалении

в несколько десятков метров и превышать пороговые установки в других ЦПП). Обладая всеми признаками полезных сигналов, они не формируют локационной серии (для расчета координат ИАЭ по известным алгоритмам АЭ-сигнал должен быть зарегистрирован не менее чем 4 геофонами). Пример подобного импульса приведен на рис. 5. Дополнительная сложность анализа показанного на нем импульса заключается в наличии повторного всплеска упругих колебаний после затухания основного волнового пакета, который в ЦПП может интерпретироваться как новый импульс. Вид этого импульса подтверждает допустимость примера, приведенного на рис. 4.

Специализированное программное обеспечение (ПО) в составе АСКГД обеспечивает непрерывный сбор геоакустических данных и – программой “GeoAcoustics ADS” – их углубленную обработку, в процессе которой определяются параметры источников АЭ,

и выполняются ряд других функций, включая представление результатов мониторинга в графическом и табличном видах и импорт АЭ-данных во внешние программы представления данных и формирования отчетов [6,7]. При этом необходимо осуществлять селекцию полезных сигналов (радикальную отбраковку помех) и некорректных результатов обработки (ошибок компоновки локационных серий и чрезмерных локационных погрешностей) на всех этапах функционирования ПО.

Под корректно-обработанным АЭ-событием следует понимать АЭ-источник, местоположение которых ДОС-точно точно рассчитано по зарегистрированным моментам прихода упругих волн на определенное лоцирующее подмножество геофонов, представляющих собой приемную антенну. В качестве последней выступает группа кодированных АЭ-импульсов (в количестве 4-7 и более) взаимосвязанная, порожденная одним актом трещинообразования и надежно зарегистрированная несколькими геофонами, сигналограммы которых характеризуются сходством огибающих и близостью всех ключевых параметров этих импульсов, включая их спектры.

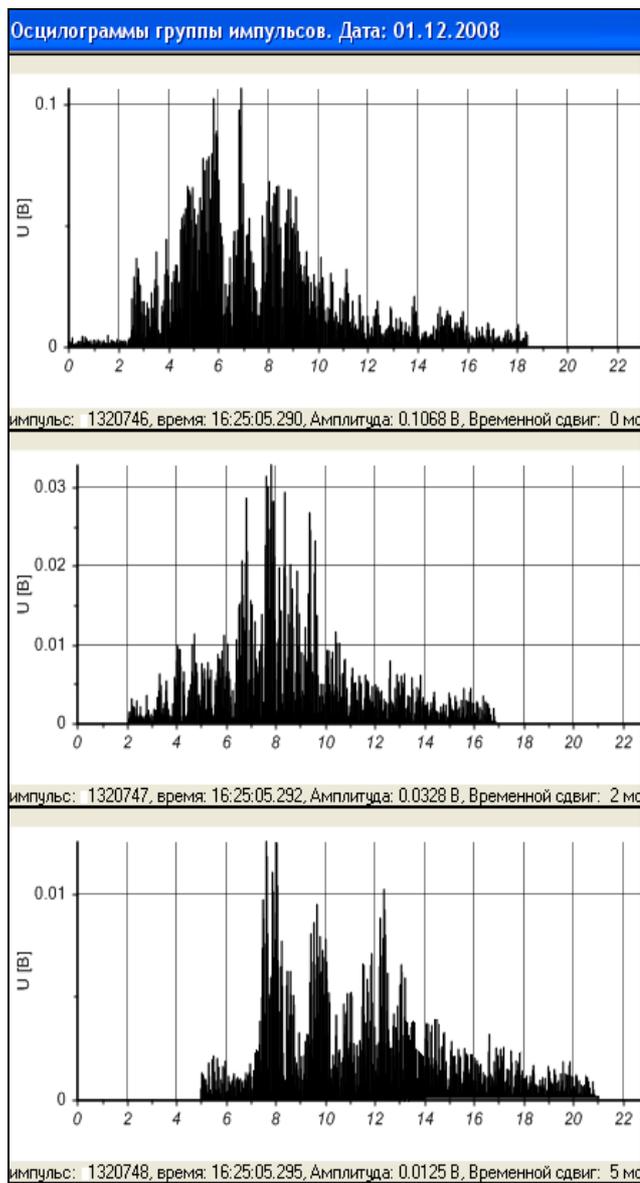
Однородность локационной серии (группы АЭ-импульсов), обеспечивает правильный расчет разностей времен прихода (РВП) между первым и каждым последующим фронтом импульса в выбранной группе. В процессе контроля на временной шкале к таким полезным сигналам присоединяются импульсные помехи самого разнообразного происхождения, что может приводить к генерации ошибочных отсчетов и обостряет проблему распознавания исходной однородной группы АЭ-импульсов среди совокупности импульсов, зарегистрированных

за интервал времени продолжительностью в 50–100 мс. Величина ошибки от учета помехового импульса (в виде погрешности локации) максимальна при попадании его в первую четверку импульсов локационной серии. А если он оказался первым по времени в такой группе, то результат локации окажется неприемлемым для дальнейшего использования даже при получении некоего локационного решения ввиду неверного расчета всех РВП.

В разработанном для АСКГД специальном ПО средства визуализации (пример – на рис. 6) позволяют не только реализовать рассмотренные выше подходы к анализу сигналов АЭ, но и производить наиболее корректное выделение локационно-пригодных групп квалифицированным оператором. Появляется также возможность формализовать основные алгоритмы предварительной обработки таблицы импульсов БД, повышающие надежность выделения однородных групп макропараметров с удалением помеховых АЭ-импульсов.

В целом результаты экспериментальных исследований показывают, что геоакустический мониторинг динамических проявлений горного давления с энергосъемлением до 200 Дж в условиях действующих горнодобывающих предприятий с повышенным уровнем технологических шумов и значительной неоднородностью геосреды предполагает решение программно-методических задач высокой сложности, связанных с обилием помеховых факторов, морфологической и структурной анизотропией объектов контроля.

Для повышения эффективности геоакустического мониторинга необходимо учитывать следующие его особенности:



**Рис. 6. Совмещенная диаграмма близких АЭ-импульсов в ПО “GeoAcoustics ADS”**

источника, причем естественные источники АЭ всегда отличает наличие максимума амплитуды в первой половине импульса;

2) измерения длительностей АЭ-импульсов и их фронтов должны быть максимально точны (на уровне погрешности 2-3 %), что позволяет продуктивно использовать эти различия для селекции импульсов от разных источников АЭ, не смешивая их, и корректно вычислять интегральные сигнатуры для импульсов и их ключевых сегментов (фронт, спад);

3) программный анализ структур огибающих АЭ-импульсов, дополненный спектральным анализом первых половин длительности импульсов, позволяет с достаточным для практики качеством решать задачу формирования выборок АЭ-импульсов (наборов данных) для локации порождающего их единичного источника АЭ;

4) необходимы дополнительный количественный учет диаграмм направленности применяемых геофонов и оптимизация использования электронных фильтров в ЦПП для разделения полезных и помеховых сигналов АЭ.

1) при формировании выборок АЭ-импульсов для локации единичного источника АЭ невозможно полагаться только на амплитудный анализ вследствие априорной неопределенности местоположения лоцируемого

---

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анцыферов М.С., Анцыферова Н.Г., Каган Я.Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. – М.: Наука, 1971. – 136 с.
2. Ямшиков В.С. Методы и средства исследования и контроля горных пород и процессов. – М.: Недра, 1982.
3. *Акустический* измерительно-вычислительный комплекс для геомеханического мониторинга массива пород при ведении горных работ / Г.А. Калинов, И.Ю. Рассказов, А.Ю. Искра, Д.А. Куликов, К.О. Харитонов // Физическая акустика. Распространение и дифракция волн. Геоакустика. Сборник трудов XVI сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС. – 2005. – С. 351-354.
4. Развитие средств акустического контроля опасных проявлений горного давления / А.Ю. Искра, И.Ю. Рассказов // Горный журнал. – 2007. – № 1. – С. 85-88.
5. Ямшиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород. – М.: Недра, 1984.
6. Рассказов И.Ю., Искра А.Ю., Кянно К.А. Алгоритмы и программное обеспечение для локации источников акустической эмиссии в системе геомеханического мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. – № 0В15. – С. 130-142.
7. Рассказов И.Ю., Искра А.Ю., Кянно К.А. Программа обработки данных геомеханического мониторинга «GeoAcoustics ADS». Свидетельство о государственной регистрации № 2008615167 от 27.10.2008 г.

**ГЛАВ****Коротко об авторах**

Искра А.Ю. – старший научный сотрудник,  
Рассказов И.Ю. – доктор технических наук, директор,  
Институт горного дела ДВО РАН, [eco@igd.khv.ru](mailto:eco@igd.khv.ru)



---

**ДИССЕРТАЦИИ****ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ  
ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ**

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
<b>ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК</b>			
КИЕНКО Лидия Андреевна	Разработка эффективной технологии обогащения карбонатно-флюоритовых руд Вознесенского рудного района	25.00.13	