

УДК 550.348 (575.2) (04)

**ЛОКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АЭ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ  
ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ЭНЕРГОВОЗДЕЙСТВИЙ  
НА ГЕОЛОГИЧЕСКУЮ СРЕДУ КАК ПРОБЛЕМА  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*П.В. Ильичёв* – зав. лаборат.

*Г.С. Закупина* – магистр

*В.А. Мубассарова* – магистр

*А.В. Аладьев* – инженер 2 катег.

*Л.М. Богомолов* – канд. физ.-мат. наук

---

New routine to determine acoustic emission (AE) source site coordinates on the base of multi-channel broadband measuring system has been described. The peculiar aspects of that how to apply source sites location while experimentations with minor rocks specimens to study the effect of electric pulses over AE have been considered as well. The results obtained may demonstrate the operationability and effectiveness of AE location measuring system and algorithm which were designed at Research Station RAS.

**Введение.** Значение системы контроля координат источников сигналов АЭ (так называемой локации) в экспериментах по разрушению образцов геоматериалов общеизвестно. Однако практически все результаты о влиянии физических полей на активность АЭ нагруженных образцов геоматериалов получены без использования такой системы. Как отмечалось в докладах [1–3], для обнаружения триггерных эффектов измерительные системы АЭ оптимизированы на отсутствие пропусков событий, что проще всего обеспечивается за счет быстрогодействия. Необходимая для локации источников АЭ многоканальность не согласуется с этим требованием. Для исследования особенностей пространственного распределения очагов при стимулировании АЭ налагаемыми извне физическими полями в ИС РАН создан новый измерительный комплекс, включающий как независимые подсистемы многоканальный блок синхронной регистрации АЭ (для локации источников) и быстродействующий широкополосный канал АЭ, подобный описанному в [2].

В проводимых ранее исследованиях на образцах горных пород [4] для локации источников акустической эмиссии использовались от двух (в простейшем случае линейной локации) до четырех датчиков АЭ, пространственно разнесённых по поверхности исследуемого образца, при этом предполагалось, что скорость распространения продольных звуковых волн в объеме образца заранее известна и постоянна. Известно также, что в процессе нагружения образцов меняется их внутренняя структура, увеличивается трещиноватость и, как следствие, меняется скорость распространения звуковых волн в материале образца. В этом случае приходится периодически проводить контроль этого параметра с помощью специальных измерений по активному прозвучиванию образца. Все это создаёт значительные трудности при проведении экспериментов.

В представленной работе предлагается способ локации источников АЭ, не требующий дополнительных измерений скорости распространения звуковых волн, который основан на использовании

дополнительного канала АЭ. Для его реализации нужно как минимум 5 синхронных высокоскоростных каналов. Отметим, что хотя при традиционном подходе к локации, когда скорость продольных волн считается известным параметром, минимальное число каналов – 4, но, как правило, все равно используется большее количество каналов АЭ (резервирование для повышения надежности и т.п.) [5]. Благодаря развитию вычислительной техники обработка данных с большего числа каналов не увеличивает время расчета координат источника, т.е. “время интерпретации”. Предложенный подход является аналогом развитому в сейсмологии методу уточнения гипоцентров и скоростной модели и в первом приближении по теории возмущений [6].

Эксперименты по крупномасштабному моделированию землетрясений [7], в частности, проведенные на 50000-тонном прессе Института физики высоких давлений РАН, продемонстрировали, насколько важную информацию дает контроль координат источников АЭ. Показательным примером могут быть полученные по этим данным результаты о кластеризации повреждений и о формировании магистрального разрыва. К сожалению, в настоящее время повторить подобные крупномасштабные эксперименты с дополнительным энерговоздействием таким, как электроимпульсы, вибрации и т. п., не представляется реальным. Широко распространено мнение, что локация источников АЭ возможна лишь в экспериментах с большими образцами, так как точность (погрешность) определения координат источника по разности времен прихода акустических волн обычно порядка 1 см. Однако уже в экспериментах Д. Локнера [8] была достигнута точность около 0,5 см при микросекундной оцифровке первичных сигналов. Применение более быстродействующих АЦП (с адаптацией всего измерительного канала) может дать еще меньшую погрешность, благодаря чему реализация методики контроля источников АЭ в экспериментах по воздействию физических полей на образцы размером порядка 10 см становится актуальной задачей. Особенностью экспериментов с модельными

энерговоздействиями, вытекающей из самой сути исследования “триггерных” эффектов, является их бесшумный характер, что обеспечивается использованием пружинных нагружающих установок (например, устройства для длительных испытаний УДИ [3]) или гравитационно-рычажных прессов. Отсутствие шумов от привода создает, в принципе, благоприятные условия для многоканальных измерений АЭ с целью локации их источников, для чего необходима некоторая модернизация методики локации, лучшее ее приспособление для небольших образцов.

**Развитие методики локации источников АЭ.** Один из выгодных с математической точки зрения вариантов расположения приемников АЭ на поверхности исследуемого образца схематично представлен на рис. 1. Особенностью данного способа расположения пьезопреобразователей как раз и является возможность вычисления по измеренным временным задержкам сигналов и геометрическим параметрам приемной решетки как координат источников АЭ, так и величины скорости распространения продольных акустических волн в толще образца. Из уравнений лучевого распространения акустических волн от “точечного” источника АЭ вытекают аналитические выражения для координат источника (x, y, z) и скорости распространения излучаемых им упругих волн (с):

$$x = \frac{c^2 \cdot (\tau_1^2 - \tau_2^2)}{4 \cdot a} + d_0 \cdot c \cdot \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{2 \cdot a}; \quad (1)$$

$$y = \frac{c^2 \cdot (\tau_3^2 - \tau_4^2)}{4 \cdot b} + d_0 \cdot c \cdot \frac{(\tau_3 - \tau_4)}{2 \cdot b}; \quad (2)$$

$$z = \sqrt{d_0^2 - x^2 - y^2}; \quad (3)$$

$$d_0 = \frac{a^2}{c \cdot (\tau_1 + \tau_2)} - \frac{c \cdot (\tau_1^2 + \tau_2^2)}{2 \cdot (\tau_1 + \tau_2)}; \quad (4)$$

$$c = \sqrt{\frac{2 \cdot b^2 \cdot (\tau_1 + \tau_2) - 2 \cdot a^2 \cdot (\tau_3 + \tau_4)}{(\tau_3^2 + \tau_4^2) \cdot (\tau_1 + \tau_2) - (\tau_1^2 + \tau_2^2) \cdot (\tau_3 + \tau_4)}}; \quad (5)$$

где  $\tau_1 \div \tau_4$  – временные задержки сигналов датчиков, расположенных в позициях P1 ÷ P4 относительно сигнала датчика в позиции P0.

Вычисляемая по формуле (5) скорость распространения продольных волн с является

одним из индикаторов, отслеживающих изменение напряженно-деформированного состояния исследуемого образца. Она может изменяться в зависимости от главного сжимающего напряжения, а также с изменением трещиноватости.

Используемая во всех алгоритмах локации источников лучевая модель распространения звуковых волн в толще исследуемых образцов предполагает изотропность и однородность свойств материала. В реальных условиях постоянство этой скорости по всем направлениям не всегда возможно. В частности, вблизи разрушения, за счет роста неоднородности распределения трещин в объеме образца, скорость распространения звуковых волн по разным направлениям может различаться и поэтому при приближении к разрушению ожидается возрастание дисперсии параметра, определяемого по формуле (5). Это может быть использовано в качестве еще одного предвестника разрушения образца.

Изложенные обстоятельства поясняют сложность отладки предложенной методики и ее освоения применительно к конкретным установкам и проверки корректности

измерений. Одним из этапов внедрения этой методики в ИС РАН является проведение пробных экспериментов по методике, требующей меньшее число идентичных измерительных каналов и предполагающей априорно известную скорость упругих волн в материале образца. Цель этого этапа – сопоставить данные по локации, полученные с применением нового измерительного комплекса с результатами широко известных работ [7, 8]. Это предопределило выбор материала образца для первых пробных экспериментов (гранит Уэстерли, [8]) и такой же, как и в [1–3], диапазон главных сжимающих напряжений. На данном этапе проведены измерения с использованием четырех измерительных каналов вместо пяти. Поскольку результат измерений на данном, промежуточном этапе, имеет определенное значение для вопроса о влиянии физических полей на АЭ, охарактеризуем кратко постановку эксперимента по нагружению образцов в присутствии электромагнитного поля и особенностей реализованной методики локации. Пробные эксперименты с многоканальной регистрацией АЭ для демон-

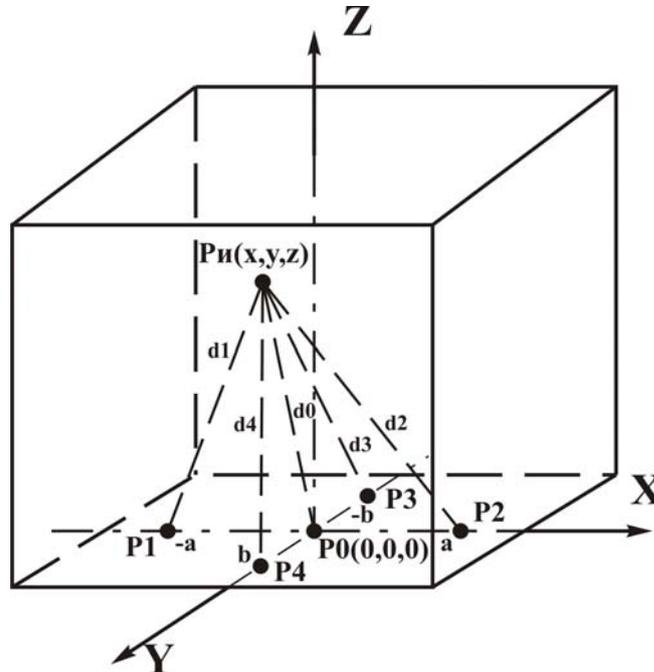


Рис. 1. Вариант взаимного расположения 5 датчиков и источника акустической эмиссии в декартовой системе координат:  $P_i(x, y, z)$  – позиция источника АЭ;  $P_0(0, 0, 0)$ ,  $P_1(-a, 0, 0)$ ,  $P_2(a, 0, 0)$ ,  $P_3(0, -b, 0)$ ,  $P_4(0, b, 0)$  – позиции приемников;  $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4$  – расстояния между источником и приемниками соответственно.

страции возможностей определения координат источников даже для сравнительно небольших образцов геоматериалов были проведены на пружинной реологической установке длительных испытаний УДИ (конструкции ВНИМИ РАН, С.-Петербург) с максимальным усилием сжатия 100 тонн. Изменение нагрузки на исследуемый образец производилось ступенчато при помощи 100-тонного гидроцилиндра с ручным приводом. После ступенчатого изменения нагрузки ее величина фиксировалась с помощью упорной гайки, и нагруженный образец находился в бесшумном режиме за счет упруго сжатых дисковых пружин. После пригрузки образец выдерживался некоторое время для релаксации переходных процессов, затем начиналась измерительная сессия, в ходе которой регистрация АЭ велась непрерывно. На переходной стадии контроль активности АЭ осуществлялся по цифровому индикатору блока синхронизации. В течение сессии с постоянной нагрузкой на образец подавались электроимпульсы прямоугольной формы (источник – генератор Г5-54) для моделирования энерговоздействий. В типичном случае амплитуда импульсов была порядка 50 В, длительность – 20–70 мкс, частота следования – 2 кГц, а время экспозиции (когда генератор включен – 1–1,5 часа). В качестве пьезопреобразователей использовались широкополосные датчики (модель SE2MEG-P), серийно выпускаемые фирмой DECI, США для рабочего диапазона частот 0,2–2,0 МГц. Датчики регистрируют колебания давления в акустических волнах, приходящих на поверхность образца от источника АЭ, при этом происходит выделение нормальных колебаний площадки, к которой прикреплен датчик.

Измерительная система, как и во всех подобных экспериментах, работает в ждущем режиме. Запуск регистрации производится управляющим каналом при условии превышения сигналом заранее установленного порога дискриминации. В качестве АЦП в измерительном комплексе были использованы

модули быстродействующих АЦП типа ФК4226 (шаг оцифровки 0,1 мкс), встраиваемые в крейт КАМАК и работающие под его управлением. КАМАК обеспечивал питание АЦП и передачу данных на персональный компьютер (через специальный контроллер). Длительность временного окна, в течение которого запоминается волновая форма сигналов АЭ, определялась объемом буферной памяти АЦП и составляла 100 мкс. Это достаточно для локации, так как и время пробега упругих волн по образцу размером 107×57×52 мм, и разность времен вступлений АЭ сигналов по различным каналам не превышали 20 мкс (скорость продольных волн в исследуемом граните 4,7 км/с [9]).

Пространственное расположение первичных преобразователей АЭ в четырехканальной схеме, а также электроды, подключенные к генератору (источники электроимпульсов) показаны на рис. 2а. Данный метод обеспечивает возможность вычисления координат источников АЭ по измеренным временным задержкам сигналов и геометрическим параметрам образца. Временные задержки сигналов, регистрируемых пьезодатчиками  $P_2$ ,  $P_3$  и  $P_4$ , измерялись относительно приемника  $P_1$  (рис. 2б).

В рассматриваемом случае выражения для определения координат источников АЭ по данным о временных задержках принимают следующую форму (вместо системы (1)–(5) в случае пяти каналов):

$$x = \frac{\tau_2 \cdot [2 \cdot (a^2 - b^2) + c^2 \cdot \tau_2 (\tau_3 + \tau_4) - c^2 \cdot (\tau_4^2 + \tau_3^2)]}{4 \cdot b \cdot (\tau_4 + \tau_3 - \tau_2)}; \quad (6)$$

$$y = \frac{(\tau_4 - \tau_3) \cdot (c^2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 + (a^2 - b^2)) - c^2 \cdot \tau_2 \cdot (\tau_4 - \tau_3)}{2 \cdot a \cdot (\tau_4 + \tau_3 - \tau_2)} - \frac{c^2 \cdot \tau_2 \cdot (\tau_4 - \tau_3)}{4 \cdot a}; \quad (7)$$

$$t_1 = \frac{2 \cdot (a^2 - b^2) - c^2 (\tau_4^2 + \tau_3^2 - \tau_2^2)}{2 \cdot c^2 \cdot (\tau_4 + \tau_3 - \tau_2)}; \quad (8)$$

$$z = \sqrt{c^2 \cdot t_1^2 - (x - b)^2 - y^2}, \quad (9)$$

где физический смысл обозначений  $\tau_2 \div \tau_4$ , с такой же, как в формулах (1)–(5).

**Результаты эксперимента.** Как было установлено в предыдущих работах [2, 3], эффект электроимпульсов проявляется в виде откликов активности АЭ, т.е. кратковременного прироста относительно квазистационара или спадающего тренда графика перед началом ЭВ. Для испытанного образца гранита на рис. 3 показан пример изменения активности АЭ со

временем входе измерительной сессии при фиксированном одноосном сжатии. Ход графика активности на начальном участке (0–3500 с) и в период подачи электроимпульсов (3500–7100 с) различен, причем отклик на ЭВ проявляется с задержкой порядка 800 с. С учетом этого, имеет смысл рассматривать результаты

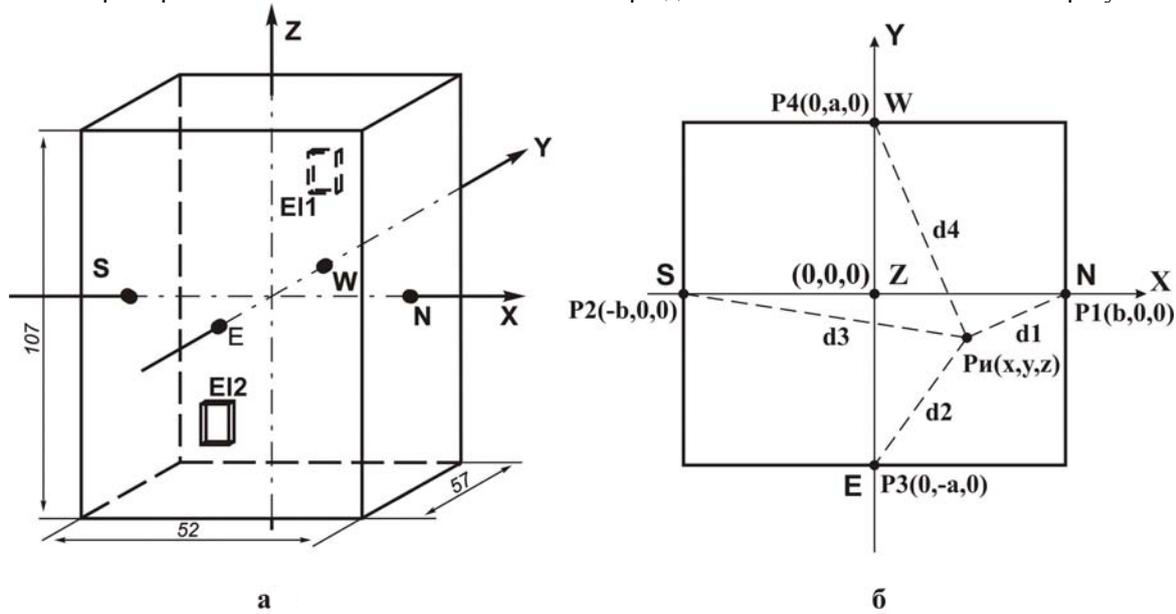


Рис. 2. Схематическое изображение испытываемого образца гранита:

- а) расположение датчиков АЭ – N, S, W, E и токопроводящих электродов – EI1, EI2 на боковых гранях образца (X, Y, Z – оси декартовой системы координат); б) горизонтальная проекция с указанием координат центров пьезопреобразователей N, S, E, W (соответственно P1, P2, P3, P4),  $P_i$  – позиция источника сигнала АЭ;  $d_1, d_2, d_3, d_4$  – расстояния от источника АЭ до приемников, т.е. до точек P1, P2, P3, P4.

расчетов координат источников событий АЭ, которые происходили на разных временных интервалах данной измерительной сессии (рис. 4), причем доверительный интервал рассеяния – 5 мм. С погрешностью в этих пределах решения для координат источника были найдены для 25% от всех событий, зарегистрированных в данной измерительной сессии.

Основная причина, по которой значительное число событий не допускает локацию их источников, – слишком низкое соотношение сигнал/шум по одному из каналов. Тем не менее, можно предполагать, на основе концепции самоподобия нагруженной геосреды, что выборка событий, для которых удалось

определить положение источников, отражает общую картину пространственного распределения возникающих структурных дефектов (источников АЭ). Из 359 найденных решений для координат источников 184 приходится на интервал 0–3500 с (т.е. до ЭВ); 149 решений – на сеанс с электромагнитным воздействием (интервал 3500–7100 с) и 26 – на интервал 7100–8330 с, т.е. после завершения ЭВ. Из совокупности полученных решений можно сформировать две подвыборки событий с примерно одинаковым числом элементов. Первая подвыборка включает лоцированные события, произошедшие в течение 0–3500 с (рис. 4а), источники этих событий проецируются на горизонтальную плоскость.

Во вторую подвыборку вошли остальные события, допустившие локацию. Из них большинство приходится на период, когда образец подвергался воздействию электроимпульсов (рис. 4б), который представляет собой горизонтальную проекцию источников событий из второй выборки. Расположение изображающих точек (рис. 4а) свидетельствует, что при данной нагрузке образец находился на переходном этапе от стадии диффузного накопления дефектов (первая стадия разрушения согласно [10]) к началу формирования плоскости разрыва (второй, быстрой стадии разрушения). Иногда этот переход характеризуют как этап кластеризации (рис. 4б), характер распределения источников АЭ не меняется после включения/выключения генератора электроимпульсов.

Сравнение проекций на другие плоскости источников АЭ, относящихся к указанным двум

выборкам, подтвердило, что кластеризация не сменилась ни приуроченностью к плоскости, ни расширением активной зоны. Таким образом, по результатам пробного эксперимента можно заключить (в предварительном порядке), что электромагнитное поле оказывает влияние на распределение возникающих в нагруженных образцах структурных дефектов во времени, а их пространственное распределение меняется незначительно. Важно, что не обнаружено признаков ускоренного перехода ко второй стадии разрушения по двухстадийной модели [10]. Если это обобщение подтвердится последующими экспериментами, оно может стать принципиальным для зарождающегося научно-технического направления – использования физических полей для оценки и контроля

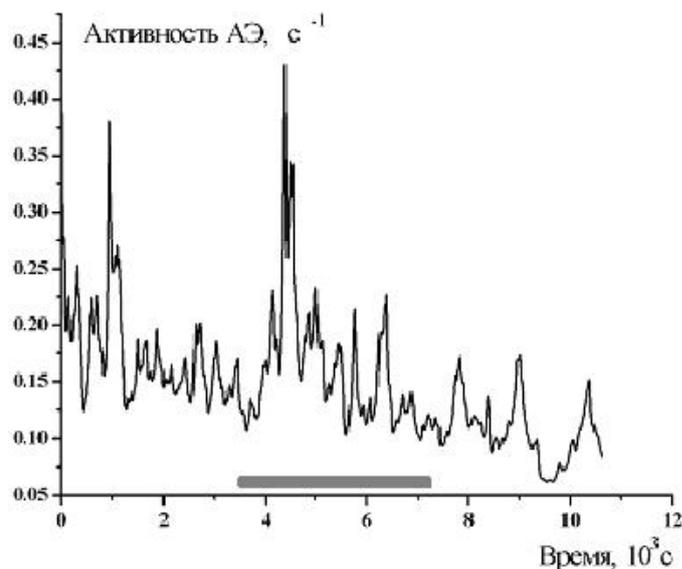


Рис. 3. Временная зависимость активности АЭ в течение эксперимента с воздействием электроимпульсами при постоянной сжимающей нагрузке 90 МПа. Сплошной линией показан интервал 3500–7100 с, когда на электроды подавались импульсы Г5-54 с амплитудой напряжения – 55 В, длительностью – 70 мкс и частотой следования – 2 кГц.

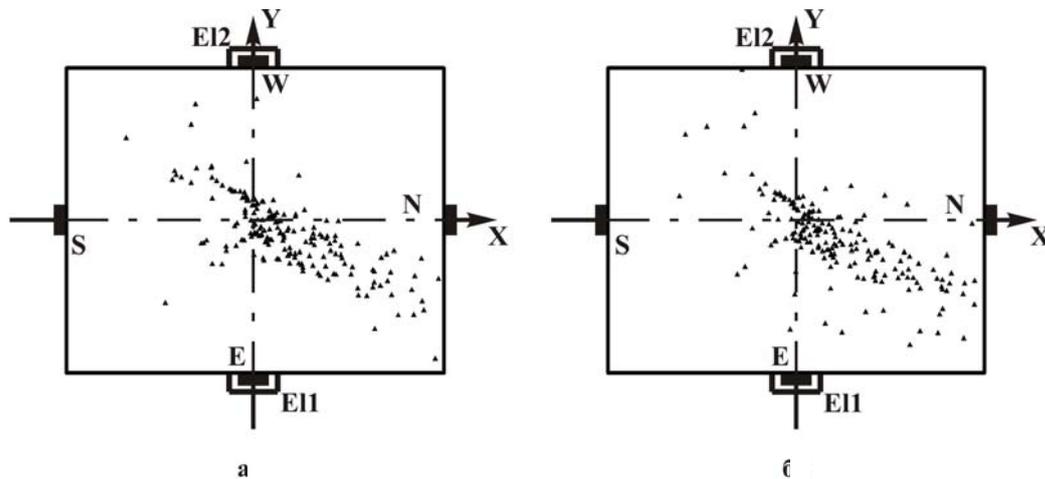


Рис. 4. Проекция положений источников АЭ на горизонтальную плоскость, на которой лежат датчики АЭ – N, S, W, E; E11, E12 – проекции электродов на ту же плоскость: а) для событий, зарегистрированных до включения генератора Г5-54; б) для событий во время и после воздействия электроимпульсов.

напряженно-деформированного состояния геосреды, включая возможность разрядки избыточных напряжений. Поясним отмеченное на примере работы [11], рассматривающей триггерные эффекты электромагнитных полей в натурном масштабе. В [11] показано, что основной прирост слабой сейсмичности под влиянием электромагнитных импульсов при пусках геофизических МГД-генераторов дают области с наибольшей фоновой сейсмичностью. Для лабораторного и натурального масштаба длин на воздействие электроимпульсов “откликаются”, прежде всего, наиболее активные зоны, где неупругие процессы дефектообразования протекают интенсивнее, чем в других местах. Это вполне естественно, так как отклонения от упругого деформирования (так называемая физическая и структурная нелинейность [12]) являются необходимым условием, предпосылкой для реализации любых триггерных эффектов. В перспективе эффект приуроченности сейсмического или акустоэмиссионного отклика на ЭВ к активным областям может быть использован для уточнения местоположения этих областей.

**Заключение.** Созданный в НС РАН измерительный комплекс на основе современных аппаратно-программных решений может обеспечить локацию источников АЭ в реологических

экспериментах с образцами небольших размеров. Достоверность эффекта отклика АЭ нагруженного геоматериала на воздействие электромагнитных импульсов подтверждена в пробном эксперименте с применением системы локации источников АЭ.

Работа выполнена в совместном учебно-научном центре НС РАН и КPCY как часть проекта “Оптимизация научной интрасети и развитие сетевых приложений для анализа пространственно-временных геоданных Тянь-Шаня и прилегающих территорий (как возможного GRID-полигона)” по Программе № 21 фундаментальных исследований Президиума РАН “Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID”.

#### Литература

1. Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н., Трапезников Ю.А., Щелочков Г.Г. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1678–1689.
2. Ильичев П.В., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Бобровский В.В. и др. Параметры акустоэмиссионных сигналов, инициированных электровоздействием на нагруженные образцы // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов. – Москва–Бишкек, 2003. – С. 286–303.

3. Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др. Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов. – Москва–Бишкек, 2003. – С. 304–318.
4. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.
5. Lockner D.L., Byerlee J.D., Kuksenko V.S. et al. Observation of quasistatic fault growth from acoustic emissions // *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*. – London: Academic Press, 1992. – P. 3–31.
6. Кабанник А.В., Чеверда В.А. Трехмерная нелинейная сейсмическая томография без трассирования лучей: одновременное восстановление скоростной структуры и гипоцентров землетрясений // *Проблемы сейсмологии 3-го тысячелетия*. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 382–388.
7. Соболев Г.А., Кольцов А.В. Крупномасштабное моделирование подготовки предвестников землетрясений. – М.: Наука, 1988. – 203 с.
8. Lockner D.L., Byerlee J.D., Kuksenko V.S. et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite // *Nature*. – 1991. – V. 350. – N 6313. – P. 39–42.
9. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах: Справочник / Под ред. М.П. Воларович. – М.: Недра, 1988. – 255 с.
10. Журков С.Н., Куксенко В.С. Петров В.А. и др. К вопросу о прогнозировании разрушения горных пород // *Физика Земли*. – 1977. – № 6. – С. 8–13.
11. Тарасов Н.Т. Изменение пространственно-временной структуры сейсмичности под воздействием мощных электромагнитных импульсов // *Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов*. – Москва–Бишкек, 2003. – С. 275–285.
12. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // *УФН*. – 2006. – Т. 176. – № 1. – С. 77–95.