

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРУКТУРЫ ГОРНЫХ ПОРОД

**Беликов В.Т., Рывкин Д.Г.** – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

**Аннотация.** Предложена количественная физическая модель для описания процессов акустической эмиссии (АЭ). Разработан алгоритм решения обратной задачи – восстановления структурно-петрофизических характеристик горных пород по амплитудно-частотному спектру АЭ. С использованием предложенного алгоритма реконструирована функция распределения по характерным размерам составляющих трещиновато-пористого пространства, а также построены соответствующие распределения пористости и излучающей удельной внутренней поверхности.

*Акустическая эмиссия, горная порода, пористость, удельная внутренняя поверхность.*

### USING THE ACOUSTIC EMISSION DATA FOR STUDY THE STRUCTURE OF ROCKS

**Belikov V.T., Ryvkin D.G** – Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

**Abstract.** A quantitative model to describe the acoustic emission (AE) is proposed. An algorithm for restoring the structural-petrophysical properties of rocks by means of the amplitude-frequency spectrum of AE has been developed. By using the proposed algorithm, the distribution function of the characteristic size of porous space was reconstructed; also corresponding distributions of porosity and radiant specific internal surface were calculated.

*Acoustic emission, rock, porosity, specific internal surface.*

#### **Введение**

Акустическая эмиссия – явление, сопутствующее многим физическим процессам в твердом теле. Среди них следует отметить, прежде всего, пластическую деформацию, образование и развитие трещин, фазовые превращения, и т. д. (Баранов, 1990; Грешников, Дробот, 1976). Особенно часто АЭ возникает при внешнем воздействии на хрупкие материалы гетерогенного строения. Обнаружено появление сигналов АЭ в горных породах, являющихся примером гетерогенного материала природного происхождения. Авторы работы (Рыкунов и др., 1979) отмечают, что возможным механизмом появления высокочастотных сейсмических шумов в геосреде может быть процесс аналогичный АЭ в твердых телах. В середине прошлого века данные по наблюдениям АЭ стали использоваться для изучения конструкционных материалов (Keizer, 1953), а также прогнозирования горных ударов в шахтах (Анцыферов и др., 1971; Виноградов, 1964). После публикации работы (Mc Kinlly et al., 1973), методы, основанные на анализе амплитудно-частотного (АЧ) спектра АЭ стали широко применяться в нефтяной и газовой промышленности. В по-

следнее время, с появлением новых технических средств, были организованы мониторинговые наблюдения АЭ в сейсмоопасных регионах с целью установления ее связи с геодинамическими процессами и катастрофическими событиями (Купцов и др., 2005; Гуфельд и др., 2009; Гордиенко и др., 2006). Подробное исследование процессов АЭ при лабораторном деформировании и разрушении крупных образцов горных пород было проведено в работе (Соболев, Пономарев, 2003). Среди проблем, которые существуют при изучении АЭ, следует отметить, прежде всего, сложности, связанные с ее интерпретацией, которая сейчас носит в основном качественный характер (Купцов и др., 2005; Троянов и др., 2000), что явно недостаточно для всестороннего анализа результатов наблюдений АЭ в горных породах. С этой точки зрения особенно актуальна в настоящее время проблема количественной интерпретации экспериментальных данных по АЭ. Очевидно, что основой для ее решения должна стать соответствующая модель и установленная на ее основе функциональная связь между параметрами АЭ и структурно-петрофизическими характеристиками геосреды. Физико-математическая модель для

количественного описания АЭ была предложена в работе (Алейников и др., 1992; 1993). В статье (Беликов, 2008) рассмотрена прямая задача по изучению зависимости морфологии АЧ спектра АЭ от структурных и физических характеристик разрушающегося твердого тела. В дальнейшем были сформулированы основные физические принципы алгоритма решения обратной задачи – восстановления параметров среды по АЧ спектру АЭ (Беликов, 2010). В силу того, что источники АЭ крайне разнообразны, в данной статье мы ограничимся рассмотрением наиболее важного с точки зрения геофизических приложений случая, когда дискретная АЭ обусловлена колебаниями межфазных поверхностей горной породы, рассматриваемой как гетерогенная среда. Таким образом, целью работы является, во-первых, разработка алгоритма восстановления структурных характеристик горной породы по наблюдаемому АЧ спектру АЭ, во-вторых, его тестирование на экспериментальном материале, полученном в лабораторных условиях.

**Постановка задачи и основные уравнения**

В работах (Алейников и др., 1992; 1993) была предложена количественная физическая модель для описания процессов генерации АЭ и получены осредненные уравнения для продольных и поперечных волн в гетерогенной среде. Функция источника  $A_i$  в этих соотношениях, характеризующая АЭ, вызванную колебаниями межфазных поверхностей, может быть записана так

$$A_i = \frac{1}{2\rho} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta}} \Delta\sigma_{ik}^{\alpha\beta} n_k^\alpha \Omega_{\alpha\beta}, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma_{ik}^{\alpha\beta} = \sigma_{ik}^\alpha - \sigma_{ik}^\beta$  – осредненная разность тензоров упругих напряжений на межфазной поверхности (границе)  $S_{\alpha\beta}$  между  $\alpha$ -ой и  $\beta$ -ой фазами гетерогенной среды,  $n_k^\alpha$  – осредненный вектор нормали, внешней по отношению к  $\alpha$ -ой фазе,  $\Omega_{\alpha\beta} = S_{\alpha\beta}/V$  – удельная внутренняя поверхность (УВП), соответствующая межфазной поверхности

$S_{\alpha\beta}$ ,  $\rho$  – плотность среды,  $V$  – величина объема осреднения. Поверхность  $S_{\alpha\beta}$  предполагается гладкой. Требование гладкости межфазной поверхности  $S_{\alpha\beta}$  необходимо для того, чтобы нормаль в каждой ее точке была определена однозначно. В выражении (1) и далее по повторяющемуся индексу  $k$  подразумевается суммирование. Преобразуем (1) следующим образом:

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1}{2\rho} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta}} \Delta\sigma_{ik}^{\alpha\beta} n_k^\alpha \Omega_{\alpha\beta} = \\ &= \frac{1}{2\rho} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta}} \left| \Delta\sigma_{ik}^{\alpha\beta} n_k^\alpha \right| e_i^{\alpha\beta} \Omega_{\alpha\beta} = \\ &= \frac{1}{2\rho} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta}} \Delta\sigma_{\alpha\beta} \Omega_{\alpha\beta} e_i^{\alpha\beta} = \frac{1}{2\rho} \sum_{\substack{\alpha, \beta \\ \alpha \neq \beta}} v_{\alpha\beta}^2 L_i^{\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\left| \Delta\sigma_{ik}^{\alpha\beta} n_k^\alpha \right| = \left| (\sigma_{ik}^\alpha - \sigma_{ik}^\beta) n_k^\alpha \right| = \Delta\sigma_{\alpha\beta}$  – модуль осредненного вектора силы, действующей на единицу площади поверхности  $S_{\alpha\beta}$ ,  $e_i^{\alpha\beta}$  – единичный вектор в ее направлении,  $L_i^{\alpha\beta} = L^{\alpha\beta} e_i^{\alpha\beta}$ ,  $L^{\alpha\beta}$  – осредненная амплитуда колебаний межфазной поверхности  $S_{\alpha\beta}$ .

Величина  $v_{\alpha\beta}$  – частота АЭ, соответствующая пульсациям межфазной поверхности  $S_{\alpha\beta}$ , определяемая так

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{ik}^{\alpha\beta} n_k^\alpha \Omega_{\alpha\beta}}{\rho L^{\alpha\beta}}} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{\alpha\beta} \Omega_{\alpha\beta}}{\rho L^{\alpha\beta}}}. \quad (3)$$

Таким образом, функция источника  $A_i$ , представленная в виде (2), описывает весь спектр источников АЭ, связанных с колебаниями различных участков межфазных поверхностей гетерогенной среды. Необходимо отметить, что согласно (3), частота  $v_{\alpha\beta}$  наряду с зависимостью от УВП  $\Omega_{\alpha\beta}$  и плотности среды  $\rho$ , определяется также и такими осредненными параметрами, как  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  и  $L^{\alpha\beta}$ . Поэтому она является характеристикой всего (коллективного) процесса излучения упругих волн межфазными поверхностями и ее не следует, вообще говоря, смешивать с характерной частотой, соответствующей например отдельному включению. Амплитуда  $L^{\alpha\beta}$ , полученная осреднением по  $S_{\alpha\beta}$  (Беликов, 2008), отлич-

на от нуля даже в том случае, когда отдельные участки межфазной поверхности неподвижны. Параметр  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  мы будем в дальнейшем называть осредненной разностью упругих напряжений на межфазной границе  $S_{\alpha\beta}$ . Минимальное значение  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  принимает при равновесии. Тогда величина  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  определяется физическими свойствами межфазной поверхности  $S_{\alpha\beta}$  и ее кривизной. В случае изотропных фаз, минимальное значение  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  совпадает с поверхностным давлением, определяемым в соответствии с формулой Лапласа (Ландау, Лифшиц, 1986). В общем случае, работа, производимая разностью упругих напряжений на границе фаз  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$ , тратится на изменение поверхностной энергии и акустическое излучение (АИ). Таким образом, когда на поверхности  $S_{\alpha\beta}$  отсутствует равновесие, величина  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  превышает ее минимальное значение. Будем предполагать, что в процессе генерации АЭ межфазная поверхность  $S_{\alpha\beta}$  слабо отклоняется от положения равновесия, тогда ее изменение (а, следовательно, и изменение поверхностной энергии) мало. В этом приближении работа разности упругих напряжений на границе фаз фактически полностью расходуется на АИ, а величина  $\Delta\sigma_{\alpha\beta}$  практически совпадает с ее равновесным значением.

В работе (Ипатов и др., 2004) были проведены наблюдения АЭ при фильтрации сухого газа и газожидкостной смеси в образцах горных пород. Основной причиной возникновения сигналов АЭ авторы считают колебания поверхностей трещин и пор за счет пульсационного характера течения флюида. Однако, в тех условиях, в которых проводились эксперименты, когда давление в установке достигало величины 60 МПа, возможно развитие процессов разрушения в горной породе. В этом случае АИ, генерируемое межфазной поверхностью, могло быть инициировано нарушением равновесия в окрестности растущих трещин. По результатам экспериментов были построены АЧ спектры АЭ. В настоящей статье эти данные использованы для разработки и тестирования алгоритма ре-

шения обратной задачи о восстановлении структурно-петрофизических характеристик среды. Для описания процессов генерации АЭ при фильтрации сухого газа в образце горной породы, последнюю следует рассматривать как двухфазную среду (скелет породы считаем гомогенным), состоящую из твердой – 1 и газообразной – 2 фаз, разделенных межфазной поверхностью  $S_{12}$ , которой соответствует УВП  $\Omega_{12}$ . Тогда функция источника  $A_i$ , в соответствии с (2), может быть записана так

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1}{\rho} \left| \Delta\sigma_{ik}^{12} n_k^1 \right| \Omega_{12} e_i^{12} = \\ &= \frac{1}{\rho} \Delta\sigma_{12} \Omega_{12} e_i^{12} = v_{12}^2 L_i^{12}, \end{aligned} \quad (4)$$

а (3) примет следующий вид

$$v = v_{12} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{12} \Omega_{12}}{\rho L^{12}}} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma \Omega}{\rho L}}, \quad (5)$$

где  $\Delta\sigma_{12} = \left| \Delta\sigma_{ik}^{12} n_k^1 \right| = \Delta\sigma$ ,  $L=L^{12}$ ,  $\Omega=\Omega_{12}$ . Формула (5) устанавливает связь между параметрами АЧ спектра АЭ ( $v$  и  $L$ ) и структурно-петрофизическими характеристиками горных пород ( $\Delta\sigma$  и  $\Omega$ ).

Трещиновато-пористое пространство (ТПП) двухфазной горной породы, с точки зрения его внутренней структуры можно рассматривать как совокупность (нередко сообщающихся между собой) трещин и пор с присущим им набором параметров, таких, например, как характерный размер, объем, морфология и площадь межфазной поверхности. Для детального изучения процессов генерации АЭ, позволяющего учесть вклад в АЧ спектр составляющих ТПП, отличающихся по значениям указанных параметров, следует ввести для них соответствующую функцию распределения (ФР). Однако, имея лишь результаты акустических измерений, в отсутствие дополнительной информации, восстановить в результате решения обратной задачи ФР, зависящую от всего вышперечисленного набора характеристик практически невозможно. Поэтому в качестве основной величины, описывающей структуру ТПП, целесообразно выбрать характерный размер и

ограничиться рассмотрением ФР лишь только по этому параметру, считая, что ТПП представляет собой совокупность (ансамбль) несоприкасающихся сфер, радиусы которых изменяются в определенном промежутке. Границы этого промежутка определяются структурой среды. Тогда радиус каждой сферы можно трактовать, как характерный (эффективный) размер соответствующей составляющей ТПП. При этом необходимо потребовать, чтобы суммарный объем и общая поверхность указанной совокупности сфер сколь угодно мало отличались от значений этих характеристик ТПП реальной горной породы. Кроме того, мы будем предполагать, что энергия, излучаемая данным ансамблем сфер в единицу времени практически совпадает с мощностью АИ генерируемого средой. Каждую из сфер мы будем рассматривать как монополь (Исакович, 1973), имеющий радиус, малый по сравнению с длиной излучаемой им волны. Использование понятия о точечном монополе в данном случае нецелесообразно, так как мы потеряем информацию о структурных характеристиках ТПП (пористости и УВП). Ранее уже предлагалось моделировать некоторые из процессов, вызывающих АЭ, излучающими сферическими полостями (Баранов, 1990; Грешников, Дробот, 1976). В работах (Беликов, 2008; 2010) изолированные поры и трещины, генерирующие АЭ в твердом теле, были заменены совокупностью сферических излучателей. В данной статье предложено использовать ансамбль сфер для изучения процессов АЭ при любой геометрии поверхности, ограничивающей трещинную фазу. Вообще говоря, мы можем ввести понятие ФР по размерам (радиусам), по отношению к произвольному ТПП, существующему в реальной горной породе, в известной степени, условно. Тем не менее, это понятие (как мы увидим ниже) позволяет более детально изучать структуру ТПП, восстанавливая по ФР излучающих сфер и соответствующие распределения по размерам таких характеристик горной породы, как пористость и УВП. Более того, ФР сфер по их

радиусу будет нести в себе информацию и о морфологии внутренней поверхности ТПП. В самом деле, величина этой поверхности будет больше, когда ее кривизна достаточно быстро меняется от точки к точке («гофрированная» поверхность) и меньше, когда такое изменение мало. Тогда, если сравнить два образца горной породы с одинаковой пористостью и разными  $\Omega$ , то у образца, УВП которого больше, межфазная поверхность скелет-поры будет более гофрированной, чем у образца с меньшей УВП. Эта особенность найдет свое отражение и в характере изменения ФР, а именно, в первом случае она в области малых радиусов будет иметь большие значения, чем во втором. Подобная замена ТПП ансамблем сфер (при оговоренных выше предположениях) может быть использована при изучении процессов АЭ для любой фазы гетерогенной среды. Для трещинной фазы горной породы ФР сфер по размерам  $f(r)$  (мы будем называть ее далее нормированной ФР) определим как относительное их количество в единице объема, приходящееся на единичный интервал радиусов, с условием нормировки  $\int_0^{\infty} f(r)dr = 1$  (Беликов, 2008; 2010). Сферы с радиусами от  $r$  до  $r+dr$  будут соответствовать составляющим ТПП горной породы, эффективный размер которых изменяется в этих же пределах. Для данного набора сфер, рассматриваемых как отдельная фаза (в рамках всего ТПП) можно, согласно (5), ввести характерную частоту. В этом случае  $\Delta\sigma$ ,  $L$  и  $\Omega$  будут соответственно осредненной разностью упругих напряжений на границе излучающих сфер, осредненной амплитудой колебаний их поверхности и УВП в данном интервале изменения радиусов. Структурные характеристики горной породы, такие как пористость  $\phi$  и УВП  $\Omega$  определяются с помощью ФР следующим образом (Беликов, 2010; Беликов, Рывкин, 2010)

$$\phi = \frac{4}{3} \pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 \tilde{f}(r) dr; \quad \Omega = 4\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \tilde{f}(r) dr. \quad (6)$$

Причем в (6) использована ФР  $\tilde{f}(r)$  (мы будем называть ее ненормированной), свя-

занная с  $f(r)$  соотношением  $\tilde{f}(r) = Nf(r)$ , где  $N$  – общее количество сфер в единице объема с радиусами от  $R_{\min}$  до  $R_{\max}$  (минимальный и максимальный размеры, соответственно). Зная  $\tilde{f}(r)$ , в соответствии с (6) можно определять пористость  $\phi$  и УВП  $\Omega$ , а также изучать их распределение в зависимости от радиуса  $r$  (характерного размера ТПП), производя интегрирование в соответствующем интервале его изменения.

Алгоритм решения задачи о восстановлении структурно-петрофизических характеристик горных пород по данным наблюдений АЭ можно подразделить на три основных этапа (Беликов, 2010). На первом должна быть проведена идентификация источников АЭ и установлена их физическая природа. На втором этапе следует определить интервал характерных размеров составляющих ТПП, которые в процессе излучения формируют наблюдаемый спектр АЭ. На третьем этапе необходимо задать распределение  $\Delta\sigma(r)$ . Допустим, как мы сказали выше, что межфазная поверхность  $S_{12}$  слабо отклоняется от ее равновесного положения, в этом случае незначительно будет меняться и ее кривизна. Применительно к набору сфер, совершающих сферически-симметричные колебания, это допущение эквивалентно предположению о том, что в процессе излучения мало меняется их радиус. В этом случае  $\Delta\sigma$  для каждого  $r$  можно принять равным его минимальному значению. Тогда, считая твердую фазу изотропной, в соответствии с формулой Лапласа, выражение для  $\Delta\sigma(r)$  можно записать так

$$\Delta\sigma(r) = \frac{K}{r}, \quad (7)$$

где  $K=2\gamma_{12}$ ,  $\gamma_{12}$  – коэффициент поверхностного натяжения (Ландау, Лифшиц, 1964). Однако, учитывая, что зависимость между  $\Delta\sigma$  и  $r$ , описываемая (7), вообще говоря, приближенная, величину  $K$  мы рассматривали как коэффициент пропорциональности (напрямую не связанный с коэффициентом поверхностного натяжения) и рассчитывали ее значение в процессе интерпретации.

Запишем основные соотношения для описания процессов АЭ при фильтрации газожидкостной смеси в образце горной породы. Когда ТПП заполнено двухфазным газожидкостным флюидом, необходимо рассмотреть три фазы: твердую – 1, жидкую – 2 и газообразную – 3, разделенные межфазными поверхностями  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  и  $S_{23}$ , которым соответствуют УВП  $\Omega_{12}$ ,  $\Omega_{13}$  и  $\Omega_{23}$ . Будем считать дисперсность жидких капель, взвешенных в газе такой, что можно пренебречь поверхностью соприкосновения жидкость-твердое тело по сравнению с поверхностями жидкость-газ и газ-твердое тело. С учетом этого предположения, в соответствии с (2), будем иметь

$$\begin{aligned} A_i &= \frac{1}{\rho} (\Delta\sigma_{13} \Omega_{13} e_i^{13} + \Delta\sigma_{23} \Omega_{23} e_i^{23}) = \\ &= \frac{1}{\rho} |\Delta\sigma_{13} \Omega_{13} e_i^{13} + \Delta\sigma_{23} \Omega_{23} e_i^{23}| e_i^{ef} = \\ &= \frac{1}{\rho} \Delta\sigma_{ef} \Omega_{ef} e_i^{ef} = v_{ef}^2 L_i^{ef}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\Omega_{ef} = S_{ef}/V = \Omega_{13} + \Omega_{23}$ ,  $S_{ef} = S_{13} + S_{23}$  – общая (эффективная) излучающая межфазная поверхность,  $\Delta\sigma_{ef}$  – средневзвешенный по  $S_{13}$  и  $S_{23}$  модуль осредненного вектора силы, действующей на единицу площади поверхности  $S_{ef}$ ,  $e_i^{ef}$  – единичный вектор в ее направлении,  $L_i^{ef} = L^{ef} e_i^{ef}$ ,  $L^{ef}$  – осредненная (по межфазной поверхности  $S_{ef}$ ) амплитуда колебаний,  $v_{ef}$  – частота, имеющая вид

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{ef} \Omega_{ef}}{\rho L^{ef}}}. \quad (9)$$

Введем два ансамбля излучающих сфер, соответствующих газовой и жидкой фазам. Причем, в соответствии с (8–9), объединим их в один и будем описывать его эффективными характеристиками  $\Delta\sigma_{ef}$ ,  $L^{ef}$  и  $\Omega_{ef}$ . В этом случае  $\Delta\sigma_{ef}$ ,  $L^{ef}$  и  $\Omega_{ef}$  будут характеризовать, соответственно, осредненную разницу упругих напряжений на границе излучающих сфер, амплитуду колебаний их поверхности и УВП в данном интервале радиусов объединенного ансамбля. Параметры  $L^{ef}$  и  $v_{ef}$  соответствуют данным по АЧ спектру АЭ, полученным в эксперименте. С учетом (6), можно записать

$$\Omega_{23} = 4\pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^2 \tilde{f}_2(r) dr = \Omega_{ef} - \Omega_{13} = \Omega_{ef} - \Omega, \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \frac{4}{3} \pi \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} r^3 \tilde{f}_2(r) dr, \quad (11)$$

где  $\tilde{f}_2(r)$  – ненормированная ФР жидкой фазы,  $\varphi_2$  – доля объема, занимаемая этой фазой. В выражении (10), в соответствии со сделанным выше предположением о пренебрежении поверхностью соприкосновения жидкость–твердое тело, мы опустили слагаемое  $\Omega_{12}$ , а также учли, что в данном приближении  $\Omega_{13} = \Omega$  – УВП скелета горной породы. Последнее утверждение учитывает также и то, что для изучения процессов АЭ при фильтрации газожидкостной смеси, использовался тот же образец, через который фильтровался сухой газ (Ипатов и др., 2004). Предполагая, что межфазная поверхность  $S_{ef}$  слабо отклоняется от ее равновесного положения и, допуская, что  $\Delta\sigma_{ef}$  можно принять равным его минимальному значению, аналогично (7), зависимость  $\Delta\sigma_{ef}(r)$  выберем так

$$\Delta\sigma_{ef}(r) = \frac{K_{ef}}{r}, \quad (12)$$

где  $K_{ef}$  – коэффициент, подлежащий определению.

### Численные расчеты и обсуждение результатов

Проведем вначале количественную интерпретацию результатов наблюдений АЭ при фильтрации сухого газа в образце горной породы. В соответствии с данными о границах интервала изменения характерных размеров ТПП (Ипатов и др., 2004), будем предполагать, что излучает весь набор сфер, радиусы которых, находятся в пределах от 1 до 100 мкм. Разобьем шкалу размеров излучающих сфер, а также шкалу частот в АЧ спектре АЭ на промежутки. В силу того, что эти шкалы разнонаправлены, минимальному размеру  $R_{\min}$  поставим в соответствие максимальную частоту в АЧ спектре, а максимальному  $R_{\max}$ , – минимальную. Тогда, аппроксимируя инте-

гралы суммами, с использованием (5–7) получим

$$K = \frac{\rho}{3\varphi} \sum_{j=1}^n r_j^2 v_j^2 L_j, \quad (13)$$

$$\tilde{f}(r_j) = \frac{\rho v_j^2 L_j}{4\pi K r_j \Delta r_j}; \quad \Omega_j = 4\pi r_j^2 \tilde{f}(r_j) \Delta r_j; \quad (14)$$

$$\varphi_j = \frac{4}{3} \pi r_j^3 \tilde{f}(r_j) \Delta r_j.$$

Обозначения в (13–14), следующие:  $n$  – число интервалов разбиения, одинаковое для шкалы размеров и шкалы частот,  $r_j$  – значение радиуса излучающей сферы, отнесенное к левому концу  $j$ -го интервала  $\Delta r_j$  шкалы размеров,  $v_j$  и  $L_j$  – значения частоты и амплитуды, отнесенные к правому концу соответствующего интервала разбиения шкалы частот,  $\varphi$  – пористость образца горной породы,  $\tilde{f}(r_j)$ ,  $\Omega_j$  и  $\varphi_j$  – значения ненормированной ФР, УВП и пористости, соответственно, в данном интервале изменения радиусов сфер, отнесенные к его левому концу. Значение пористости, принятое нами  $\varphi=0,15$ , соответствовало средней ее величине для использованной в работе (Ипатов и др., 2004) коллекции образцов. В первом приближении коэффициент  $K$  считался постоянным во всем промежутке изменения размеров излучающих сфер и определялся в соответствии с (13). Затем по формулам (14) вычислялись поинтервальные значения ненормированной ФР  $\tilde{f}(r_j)$ , УВП  $\Omega_j$  и пористости  $\varphi_j$ . Далее, рассчитывались соответствующие значения нормированной ФР  $f(r_j)$ . Во втором приближении мы считали, что коэффициент  $K$  может принимать различные значения в каждом из интервалов изменения радиусов излучающих сфер. Это предположение моделирует ситуацию, при которой колеблющиеся участки межфазной поверхности ТПП горной породы находится во включениях с различными физическими (в том числе и упругими) характеристиками. Для определения поинтервальных значений коэффициента  $K$  была использована процедура, сводящаяся к поиску экстремума функцио-

нала, характеризующего полную (в том числе и поверхностную) свободную энергию среды (Беликов, Рывкин, 2010).

Известно, что при процессах, происходящих при постоянных температуре и объеме, свободная энергия тела стремится к минимуму (Ландау, Лифшиц, 1964). Для двухфазной горной породы ее свободная энергия  $F$  может быть представлена так  $F = F_1 + F_2 + F_{12}$ , где  $F_1$ ,  $F_2$ , и  $F_{12}$  – свободная энергия твердой и газообразной фазы, а также поверхностная свободная энергия, рассчитанные на единицу объема, соответственно. Если считать твердую фазу изотропной, величина  $F_{12}$  может быть записана так  $F_{12} = \gamma_{12}\Omega$  (Беликов, Шестаков, 2008). Будем предполагать, что процесс генерации АЭ происходит в условиях, когда горная порода находится в состоянии близком к термодинамическому равновесию, при котором ее свободная энергия  $F$  имеет минимум. При постоянных объеме и температуре это условие, в соответствии с приведенными выше равенствами, эквивалентно требованию минимума поверхностной свободной энергии  $F_{12}$ . Это, в свою очередь, означает, что (при постоянстве коэффициента поверхностного натяжения  $\gamma_{12}$ ) к минимуму стремится УВП  $\Omega$  при неизменном объеме фаз. Последнее условие подразумевает постоянство пористости. Таким образом, во втором приближении расчеты выполнялись в следующей последовательности. В каждом интервале шкалы размеров происходило варьирование коэффициента пропорциональности  $K$ , приня-

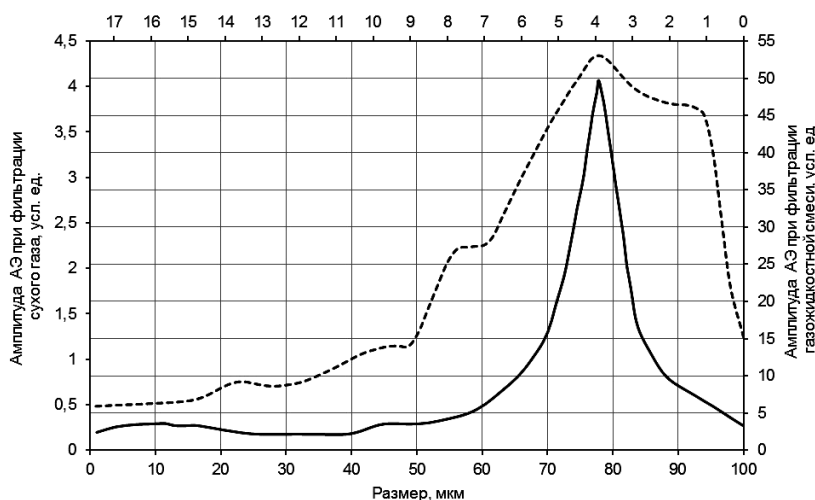
того в первом приближении. Затем, в соответствии с (14), вычислялись значения УВП и пористости в каждом промежутке изменения радиуса и пересчитывались значения ФР  $\tilde{f}(r_j)$ .

Далее, по формулам  $\Omega = \Sigma \Omega_j$ ,  $\varphi = \Sigma \tilde{\varphi}_j$ , вычислялись общая УВП  $\Omega$  и общая пористость  $\tilde{\varphi}$ . В качестве истинного выбирался вариант, при котором УВП  $\Omega$  была минимальной, а  $\tilde{\varphi}$  отличалась от  $\varphi$  не более чем на пятнадцать процентов. Распределение амплитуд  $L$  в зависимости от радиуса, построенное с использованием АЧ спектра, полученного по результатам наблюдений АЭ при фильтрации сухого газа (Ипатов и др., 2004), приведено на рис. 1.

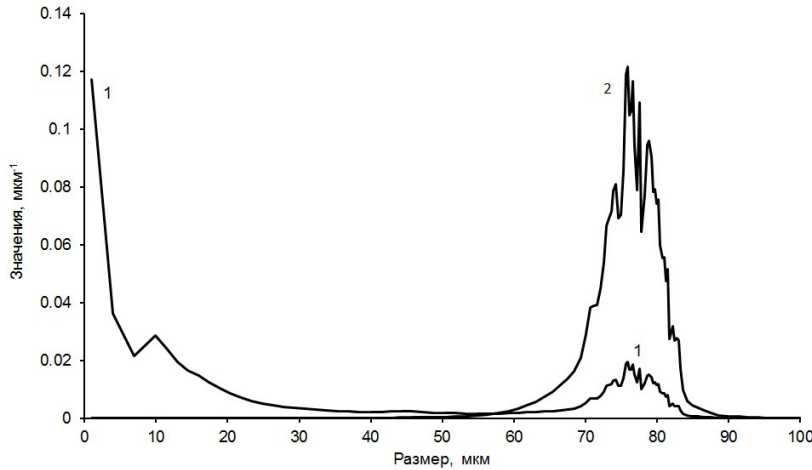
Восстановленные для этого случая нормированные ФР  $f(r)$  излучающих сфер по размерам, соответствующие первому и второму (исправленная) приближениям, представлены на рис. 2.

Анализ графиков на рис. 1 и 2 показывает, что область максимальных значений амплитуд хорошо коррелирует с областью максимальных значений исправленной ФР  $f(r)$ .

Сравнивая нормированные ФР, полученные в первом и втором приближениях, можно отметить, что вторая имеет в области малых радиусов существенно меньшие значения, чем ФР, полученная в первом приближении. При этом характер ее изменения в этой области размеров в большей степени соответствует распределению амплитуд АЭ в зависимости от радиуса излучающих сфер.



**Рис. 1.** Распределения амплитуд АЭ при фильтрации сухого газа (сплошная линия) и газожидкостной смеси (пунктир). Верхняя шкала – соответствующая частота (кГц)



**Рис. 2.** Нормированная функция распределения  $f(r)$ ; 1 – первое приближение; 2 – второе приближение

Следует отметить, что у ФР, второго приближения существенно меняется морфология по сравнению с ФР первого приближения. В тоже время, соответствующее изменение общей УВП не столь значительное (порядка 20 %).

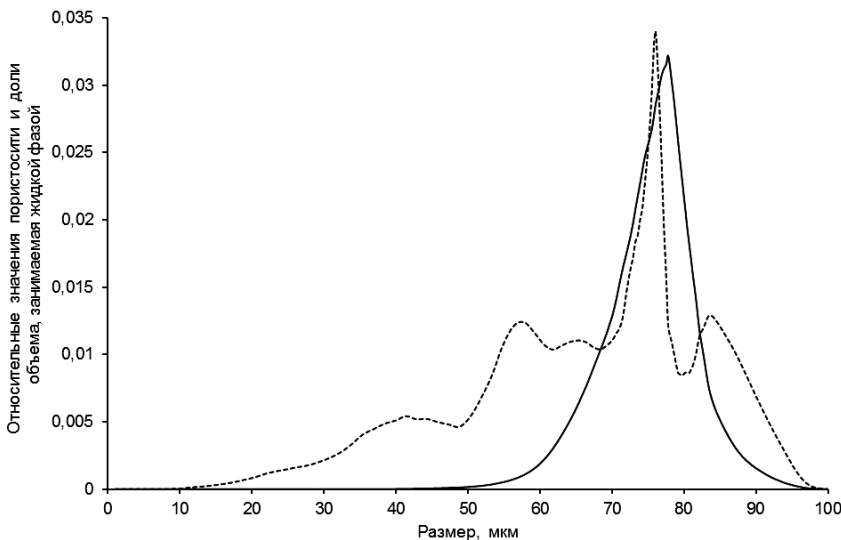
Таким образом в результате варьирования коэффициента  $K$  фактически происходит перераспределение значений ФР первого приближения, между областями больших и малых размеров. Так как второе приближение соответствует минимуму УВП, то представленные на рис. 2 результаты являются иллюстрацией сделанного выше замечания о том, что ФР по характерному размеру составляющих ТПП, несет в себе информацию о величине и морфологии межфазной поверхности.

На рис. 3 и 4 приведены распределения относительных (по отношению к  $\phi$  и  $\Omega$ ) значений пористости и УВП в зависи-

мости от характерного размера ТПП, соответствующие второму приближению.

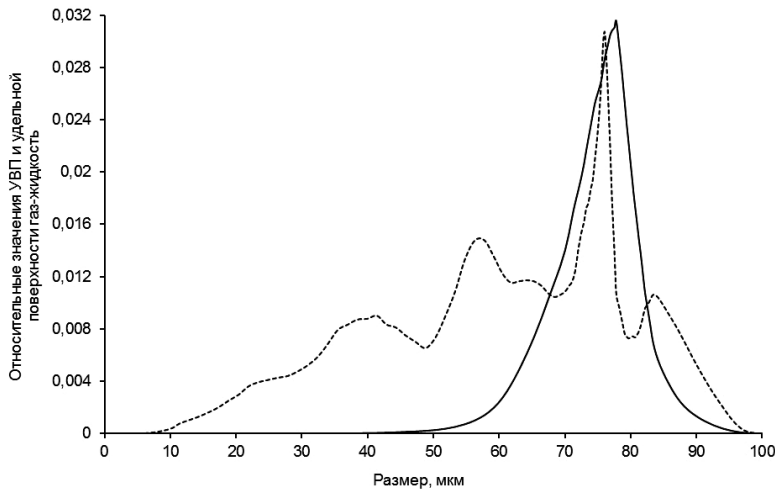
Анализируя графики на рис. 1, 3 и 4, также можно отметить взаимосвязь областей максимальных значений в распределениях пористости и УВП с областью максимальных значений амплитуд АЭ при фильтрации сухого газа. Это свидетельствует о том, что участки межфазной поверхности именно из этого интервала характерных размеров (60–90 мкм) дают основной вклад в регистрируемое излучение. Выше, мы уже отмечали, что АЭ обусловлена колебаниями поверхностей трещин и пор, выведенных из равновесия фильтрующимся флюидом. Отсюда следует, что фильтрация газа осуществляется, в основном, по составляющим ТПП, характерные размеры которых лежат в указанном интервале 60–90 мкм.

Рассмотрим вопрос об интерпретации экспериментальных данных по АЧ спек-



**Рис. 3.** Распределения относительных значений пористости  $\phi(r)$  (сплошная линия) и доли объема, занимаемая жидкой фазой  $\phi_2(r)$  (пунктир), соответствующие второму приближению





**Рис. 4.** Распределения относительных значений УВП  $\Omega(r)$  (сплошная линия) и  $\Omega_{23}(r)$  (пунктир), соответствующие второму приближению

тру, полученному в результате регистрации АЭ при фильтрации газожидкостной смеси в образце горной породы. Основой для количественных расчетов будут являться соотношения (8–12). Интервал изменения размеров объединенного ансамбля излучающих сфер, точки разбиения, а также соответствующая область частот в АЧ спектре АЭ и ее точки разбиения были взяты такими же, как и для рассмотренного выше случая двухфазной среды. Осуществляя разбиение интервала частот и размеров на промежутки и, заменяя интегралы суммами, с использованием (9–12), получим

$$K_{ef} = \frac{\rho}{3(\varphi_2 + \varphi)} \sum_{j=1}^n r_j^2 v_{eff}^2 L_j^{ef}; \quad (15)$$

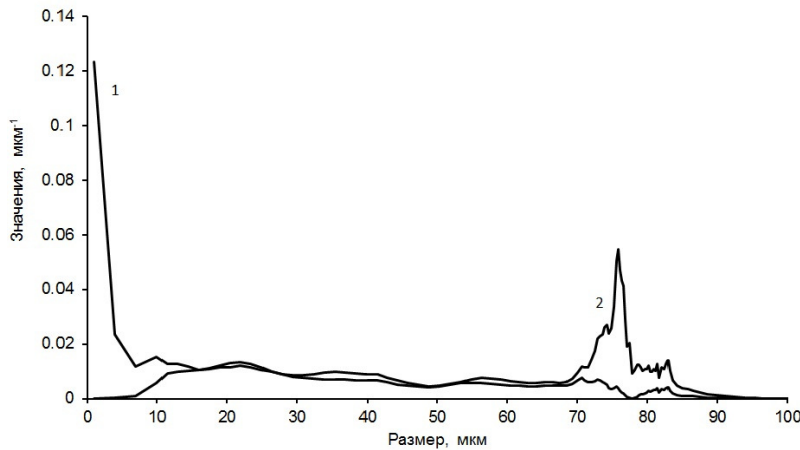
$$\tilde{f}_2(r_j) = \frac{\rho v_{eff}^2 L_j^{ef} r_j - K_{ef} \Omega_j}{4\pi K_{ef} r_j^2 \Delta r_j},$$

$$\varphi_{2j} = \frac{4}{3} \pi r_j^3 \tilde{f}_2(r_j) \Delta r_j; \quad \Omega_{23j} = 4\pi r_j^2 \tilde{f}_2(r_j) \Delta r_j. \quad (16)$$

При проведении расчетов, в первом приближении коэффициент  $K_{ef}$  предполагался одинаковым во всем интервале характерных размеров и рассчитывался по первой формуле (15). По второму соотношению (15) вычислялись поинтервальные значения ФР  $\tilde{f}_2(r)$ , а затем согласно (16), величины  $\varphi_{2j}$  и  $\Omega_{23j}$ . Далее, рассчитывались значения нормированной ФР  $f_2(r)$ . Во втором приближении в каждом интервале шкалы размеров происходило варьирование коэффициента пропорциональности

$K_{ef}$ , полученного в первом приближении. Затем, по формулам (15) и (16) осуществлялся пересчет значений  $\tilde{f}_2(r_j)$ ,  $\varphi_{2j}$  и  $\Omega_{23j}$ , а также вычислялись  $\Omega_{23}$  и  $\varphi_2$ .

Так как поверхностная свободная энергия равна в данном случае  $F_s = F_{13} + F_{23} = \gamma_{13} \Omega_{13} + \gamma_{23} \Omega_{23} = \gamma_{13} \Omega + \gamma_{23} \Omega_{23}$ , то при постоянстве  $\gamma_{13}$  и  $\gamma_{23}$ , а также известной (и фиксированной)  $\Omega$  условие минимума  $F_s$  равносильно требованию минимума величины  $\Omega_{23}$ . Поэтому в качестве истинного, выбирался вариант, при котором УВП  $\Omega_{23}$  была минимальной, а вычисленное значение  $\varphi_2$  отличалось от заданного не более чем на пятнадцать процентов. Согласно (15–16), для определения поинтервальных значений  $\tilde{f}_2(r_j)$ ,  $\varphi_{2j}$  и  $\Omega_{23j}$  необходимо знать величину доли объема, занимаемого жидкой фазой  $\varphi_2$ . При этом не при всех ее значениях, в рамках рассматриваемой модели, можно получить физически допустимые результаты. Причина этого заключается в том, что взаимосвязь между  $\varphi_2$  и  $\Omega_{23}$  нам неизвестна. Поэтому когда мы независимо задаем величину  $\varphi_2$ , может оказаться, что при ее относительно небольших значениях, в некоторых интервалах  $\Omega_{efj} = v_{eff}^2 L_j^{ef} \rho r_j / K_{ef} \leq \Omega_j$ , в то время как неравенство  $\Omega_{ef} > \Omega$  выполняется. Тогда, в соответствии со второй формулой (15) в этих же интервалах ФР  $\tilde{f}_2(r_j)$  будет отрицательной. При принятом нами  $\varphi = 0,15$  пороговое значение  $\varphi_2$ , ниже которого возникает такая ситуация, составляет  $\varphi_2 = 0,136$ . Эту величину мы использовали в расчетах.



**Рис. 5.** Нормированная функция распределения  $f_2(r)$ ; 1 – первое приближение; 2 – второе приближение

Распределение амплитуд АЭ, зарегистрированных при фильтрации газовой смеси, в зависимости от радиуса излучающих сфер, построенное на основании АЧ спектра, полученного в работе (Ипатов и др., 2004), приведено на рис. 1.

Из сравнения графиков на рис. 1, следует, что наблюдаемая амплитуда АЭ при фильтрации газожидкостной смеси, существенно превышает соответствующие значения амплитуд при фильтрации сухого газа. Связано это, по-видимому, с тем, что в данном случае увеличивается вклад в  $L^{ef}$  относительно высоких (по сравнению с  $L$ ) значений амплитуд колебаний пузырьков жидкости. На рис. 5 представлены нормированные ФР  $f_2(r)$ , полученные в первом и втором (исправленная) приближениях.

Как видно из графиков на рис. 1, 2 и 5, область максимальных значений амплитуд АЭ, хорошо коррелирует с областями максимальных значений исправленных ФР  $f(r)$  и  $f_2(r)$ . Если же сравнивать нормированные ФР  $f_2(r)$ , полученные в первом и втором приближениях, то необходимо отметить их существенное отличие в области малых размеров, аналогичное тому, которое наблюдалось для ФР  $f(r)$  (см. рис. 2). Кроме того, как следует из графиков на рис. 2 и 5, максимальные значения исправленной ФР  $f_2(r)$  находятся приблизительно в той же области радиусов, что и максимальные значения ФР  $f(r)$  второго приближения. Это свидетельствует о том, что фильтрация газовой смеси и сухого газа в основном происходит по составляющим ТПП, характерные размеры которых лежат

приблизительно в одном и том же интервале. На рис. 3 и 4 приведены распределения относительных (по отношению к  $\varphi_2$  и  $\Omega_{23}$ ) значений  $\varphi_2(r)$  и  $\Omega_{23}(r)$ , соответствующие ФР  $f_2(r)$  второго приближения. Анализируя графики на рис. 1, 3 и 4, можно отметить, что область размеров, где регистрируются максимальные значения амплитуд АЭ при фильтрации газожидкостной смеси, соответствует областям максимальных значений в распределениях  $\varphi_2(r)$  и  $\Omega_{23}(r)$ . Кроме того, морфология этих распределений позволяет сделать вывод о том, что уширение в этой области размеров (и частот) АЧ спектра АЭ при фильтрации двухфазного флюида, по сравнению со спектром для сухого газа (см. рис. 1), обусловлено появлением дополнительных излучателей, в данном случае пузырьков жидкости.

### Заключение

Предложенная методика количественной интерпретации результатов наблюдений АЭ, базируется на соотношениях, описывающих взаимосвязь между параметрами АИ и структурно-петрофизическими характеристиками горной породы. Она позволяет учитывать относительный вклад источников, отличающихся по своим характерным размерам, в различные участки АЧ спектра АЭ. При интерпретации сигналов АЭ, зарегистрированных при фильтрации сухого газа в образце горной породы удалось построить нормированную ФР излучающих сфер по их радиусам, моделирующую распределение по характерным размерам составляющих ТПП. С ее использованием, были восстановлены соот-

ветствующие распределения пористости и УВП. При интерпретации результатов наблюдений АЭ при фильтрации газожидкостной смеси была построена ФР по размерам жидкой фазы. При этом было показано, что уширение АЧ спектра АЭ в области максимальных значений амплитуд, наблюдающееся при фильтрации газожидкостной смеси, связано с появлением в этом интервале размеров дополнительных излучателей, каковыми являются взвешенные в газе капельки жидкости. Предложенная методика корректировки ФР, основанная на процедуре минимизации свободной поверхностной энергии и сводящаяся к поиску минимума излучающей УВП при постоянном объеме, занимаемом фазами (в случае двухфазной среды при постоянной пористости  $\phi$ ), позволила получить результаты, лучше согласующиеся с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований УрО РАН, проекты № 12-Т-5-1004, № 12-П-5-1018.

#### Литература

Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И., Троянов А.К. Интерпретация наблюдений сигналов акустической эмиссии на Уральской сверхглубокой скважине // Геология и геофизика. 1992. № 6. С. 118–126.

Алейников А.Л., Беликов В.Т., Немзоров Н.И. Акустическая эмиссия в гетерогенных средах // Дефектоскопия. 1993. № 3. С. 31–36.

Анцыферов И. И., Анцыферова Н. Г., Каган Я. Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. М.: Наука, 1971. 136 с.

Баранов В.М. Акустические измерения в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

Беликов В.Т. Моделирование процессов акустической эмиссии в твердом теле // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 77–84.

Беликов В.Т., Шестаков А.Ф. Изучение временных изменений напряженного состояния геосреды в процессе разрушения // Геология и геофизика. 2008. № 5. С. 461–470.

Беликов В.Т. Восстановление структурных характеристик разрушающегося твердого тела по амплитудно-частотному спектру акустической эмиссии // Дефектоскопия. 2010. № 1. С. 56–63.

Беликов В.Т., Рывкин Д.Г. Использование амплитудно-частотного спектра акустической эмиссии для восстановления функции распределения трещин по размерам // Дефектоскопия. 2010. № 10. С. 26–33.

Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. М.: Наука, 1964. 84 с.

Гордиенко В.А., Гордиенко Т.В., Куцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Рутенко А.Н., Шевцов Б.М. Геоакустическая локация областей подготовки землетрясений // ДАН. 2006. Т. 407. № 5. С. 669–672.

Грешиников В. А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.: Издательство стандартов, 1976. 272 с.

Гуфельд И.А., Корольков А.В., Новоселов О.Н. Отражение геодинамических процессов в локальной геоакустической эмиссии // Вулканология и сейсмология. 2009. № 6. С. 62–73.

Ипатов А.И., Городнов А.В., Ипатов С.И., Марьяненко Н.Н., Петров Л.П., Скопинцев С.П. Исследование амплитудно-частотных спектров сигналов акустического и электромагнитного шума при фильтрации флюидов в породах // Геофизика. 2004. № 2. С. 25–30.

Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.

Куцов А.В., Ларионов И.А., Шевцов Б.М. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 5. С. 45–59.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 568 с.

Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Физика Земли. 1979. № 11. С. 72–77.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука, 2003. 270 с.

Троянов А.К., Астраханцев Ю.Г., Дьяконов Б.П. Трехкомпонентный геоакустический каротаж-методическое и аппаратно-программное обеспечение // Каротажник. 2000. Вып. 68. С. 17–33.

Keizer J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1953, H. 1/2. S. 43–45.

Mc Kinly R.M., Bower E.M., Rumble R.C. The structure and interpretation of noise from flow behind cemented casing // JPT, 1973, SPE N3999, №3, P. 329–338.