

**АНАЛИЗ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ОБРАЗЦАХ
ГЕОМАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ**

**БИР ОКТУК КЫСУУ ШАРТТАРЫНДА ГЕОМАТЕРИАЛДАРДЫН ҮЛГҮЛӨРҮНҮН
АКУСТИКАЛЫК ЭМИССИЯ СИГНАЛДАРЫНЫН АНАЛИЗИ**

Кульков Дмитрий Сергеевич, старший инженер Лаборатории моделирования энергонасыщенных сред, Научная Станция РАН в г. Бишкек, 720049, Кыргызстан, e-mail: kulkov.dmitrii @yandex.ru

Имашев Санжар Абылбекович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Лаборатории моделирования энергонасыщенных сред, Научная Станция РАН в г. Бишкек, 720049, Кыргызстан, e-mail: sanzhar.imashev@gmail.com

Аннотация. В работе представлены результаты анализа сигналов акустической эмиссии, мониторинг которой используется в задачах исследования процессов деформации горных пород на различных стадиях разрушения при проведении лабораторных

экспериментов на одноосное сжатие на в Лаборатории моделирования энергонасыщенных сред Научной станции РАН в г. Бишкек. Регистрируемые сигналы акустической эмиссии представляют собой волновые формы различных видов: полезные сигналы, шумовые и их комбинации, различающиеся по амплитудно-частотному спектру и мощности сигнала. Разработанная методика предварительной обработки данных регистрации акустической эмиссии использует особенности волновых форм акустоэмиссионных сигналов, а также их амплитудно-частотные спектры для расчета критериев (P_1 , P_2) отбраковки шумовых компонент. Она позволяет выделять в автоматизированном режиме полезные сигналы акустической эмиссии из общего массива данных на основе гистограмм и диаграммы рассеивания параметров P_1 , P_2 , в которой образуются области, группирующиеся в отдельные кластеры, соответствующие полезным и шумовым акустоэмиссионным сигналам. Выделенные таким образом области используются для последующего расчета накоплений событий акустической эмиссии, несущие информацию о динамике процесса разрушения образцов горных пород.

Ключевые слова. Акустическая эмиссия, отбраковка шумовых компонент, амплитудно-частотный спектр, волновая форма.

ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS IN GEOMATERIAL SPECIMENS DURING UNIAXIAL COMPRESSION

Kulkov Dmitrii Sergeevich, Senior engineer of Laboratory of Energy-Saturated Media Simulation, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, 720049, Kyrgyzstan, email: kulkov.dmitrii @yandex.ru

Imashev Sanjar Abylbekovich, Candidate of Science in Physics and Mathematics, Senior Researcher of Laboratory of Energy-Saturated Media Simulation, Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, 720049, Kyrgyzstan, email: sanzhar.imashev@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of analysis of acoustic emission signals, monitoring of which is used in study of the processes of rock deformation at various stages of destruction during laboratory experiments on uniaxial compression in Laboratory Energy-Saturated Media Simulation of Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek. Registered acoustic emission signals are waveforms of various types: useful signals, noise, and their combinations, differing in both amplitude-frequency spectrum and signal power. The developed method of preliminary processing of acoustic emission data uses these features of the acoustic emission waveforms, as well as their amplitude-frequency spectra to calculate the criteria (P_1 , P_2) for the rejection of noise components. It allows automated extraction of useful acoustic emission signals from the total data set based on histograms and scatterplot of P_1 , P_2 parameters, which has the regions, grouped into separate clusters, corresponding to useful and noisy acoustic emission signals. The regions selected in this way are used for the subsequent calculation of accumulative number of acoustic emission events that describes dynamics of the process of rock samples destruction.

Keywords. Acoustic emission, rejection of noise components, amplitude-frequency spectrum, waveform.

Введение. Изучение влияния электромагнитных импульсов на неупругую деформацию и разрушение геосреды является одной актуальных задач геофизики [1],[2]. Наряду с измерениями геоакустической эмиссии и сейсмического шума [3],[4] существенный вклад в исследование реакции геосреды на энерговоздействие вносит и физическое моделирование на образцах горных пород. Одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), т.к. он может быть применен для

определения повреждаемости как образцов при лабораторных испытаниях, так и различных сооружений [5-7].

Явление акустической эмиссии представляет собой излучение упругих волн, возникающее в результате необратимых изменений в структуре твердых тел под влиянием факторов различной физической природы [5],[7]. Сами сигналы акустической эмиссии представляют собой поток акустических колебаний поверхности исследуемого образца, регистрируемой высокочувствительной аппаратурой.

Аппаратура и методика. Данные акустической эмиссии были получены в ходе экспериментов на рычажной установке [8], максимальная нагрузка которой, в режиме одноосного сжатия может достигать 250 кН. Образцами являются различные геоматериалы в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами Д x Ш x В (35см x 22см x 79см). В данной работе анализ проводился на примере образца гранита, однако, описанная методика является универсальной и подходит для образцов других горных пород, используемых в лабораторных экспериментах в ЛМЭС НС РАН, в частности, образцов мрамора и габбро.

На рисунке 1 приведена рычажная установка и образец с установленными и закрепленными на нем датчиками.



Рис. 1. Образец геоматериала (гранит) перед началом эксперимента:

- 1 – пята рычажной установки,
- 2 – образец геоматериала,
- 3 – пьезоэлектрический датчик акустической эмиссии SE-2MEG-P,
- 4 – датчики деформации

Регистрация сигналов АЭ осуществляется в ждущем режиме при условии превышения амплитуды сигнала установленного порога дискриминатора и в течение интервала времени, определяемого объемом буфера памяти АЦП и периодом дискретизации сигналов. Перед началом эксперимента задается порог амплитудного дискриминатора и оценивается устойчивость срабатывания системы запуска. Далее сигналы оцифровываются 8 канальным блоком АЦП USB 3000 с разрядностью 14 бит и максимальной частотой 3 МГц, и затем записываются на жесткий диск персонального компьютера в автоматическом режиме [9].

Схема регистрации акустико-эмиссионных сигналов представлена на рисунке 2.

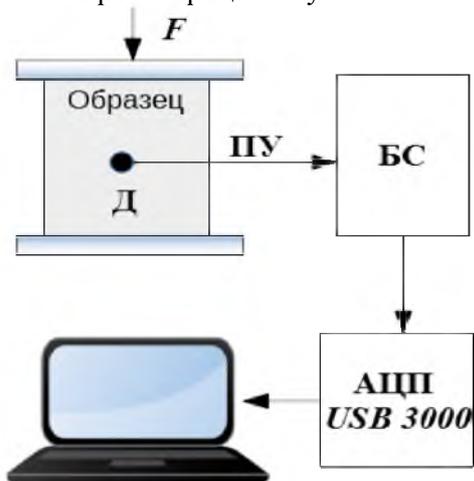


Рис. 2. Схема измерительного тракта АЭ: Д – датчик акустической эмиссии, ПУ – предварительный усилитель, БС – блок синхронизации

Сигналы АЭ регистрировались датчиками SE-2MEG-P (DECI, США), которые располагаются на поверхности исследуемом образце. Данные датчики представляют собой миниатюрные пьезоэлектрические преобразователи, которые переводят колебания поверхности материала в электрический сигнал в частотном диапазоне от 200 кГц до 2 МГц. После производится обработка полученных данных с использованием пакета Matlab [10]. В процессе эксперимента фиксируется большое количество (от 15000 до 400000) различных сигналов АЭ, среди которых присутствуют полезные сигналы, шум и их комбинации. На рисунке 3 показаны примеры такого рода сигналов и их амплитудно-частотный спектр.

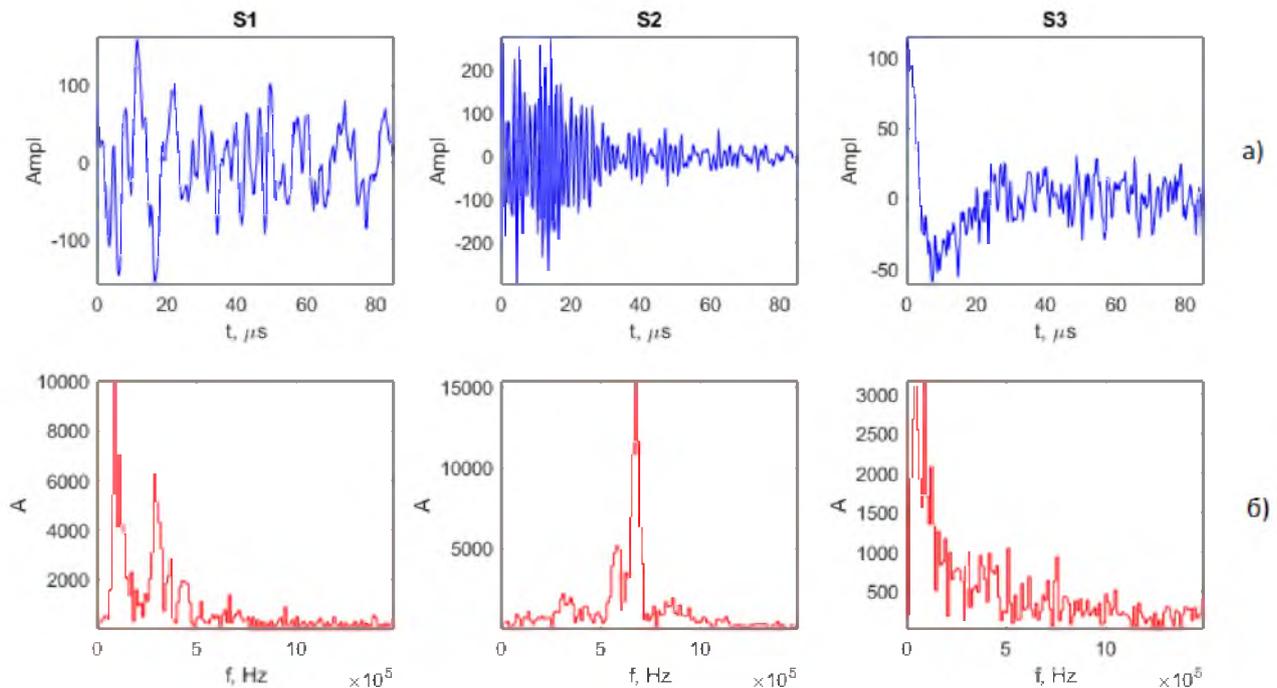


Рис. 3. Сигналы АЭ (а) и их амплитудно-частотный спектр (б). S1 – комбинированный сигнал, S2 – полезный сигнал, S3 – шум

Полезный сигнал имеет волновую форму, содержащую характерный всплеск и медленное затухание в пределах до ~40 мкс. Шумовой сигнал характеризуется отсутствием ярко выраженной волновой формы, малой амплитудой и доминированием низкочастотных составляющих в спектре. Комбинированные же сигналы являются наложением низкочастотной составляющей вне диапазона регистрации датчика (0-200 кГц) на полезный сигнал низком амплитуды.

Первый этап предварительной обработки сигналов акустической эмиссии включает в себя фильтрацию полосы частот в амплитудно-частотном спектре, вне рабочего диапазона датчика (от 0 до 200 кГц), согласно его калибровочной кривой.

Анализ волновых форм показал, что большая часть мощности полезного акустического сигнала приходится на временной отрезок 0-40 мкс, поэтому за для отделения полезного сигнала от шумового, было взято отношение в виде доли мощности волновой формы сигнала на данном отрезке, к мощности всего сигнала.

$$P_1 = \frac{\sum_{t=0}^{t_n} S^2}{\sum_{t=0}^{t_{end}} S^2}, \quad (1)$$

где S^2 – мощность сигнала, t_n – длительность участка, содержащего волновую форму (~ 20–40 мкс), t_{end} – длительность всего сигнала.

Во втором этапе использовался анализ амплитудно-частотного спектра сигналов, в котором рассчитывались отношения сумм амплитудно-частотного спектра в диапазоне от f_n до f_{end} к сумме амплитуд в спектре всего сигнала.

$$P_2 = \frac{\sum_{f_n}^{f_{end}} A}{\sum_{f=0}^{f_{end}} A}, \quad (2)$$

где A – амплитуда спектра, f_n – предел чувствительности датчика (200 кГц), f_{end} – 1.5 МГц (частота Найквиста, исходя из предела дискретизация АЦП USB 3000 - 3 МГц).

Результаты и обсуждение. Диаграмма рассеивания параметров P_1 и P_2 , а также их гистограммы распределения представлены на рисунке 4.

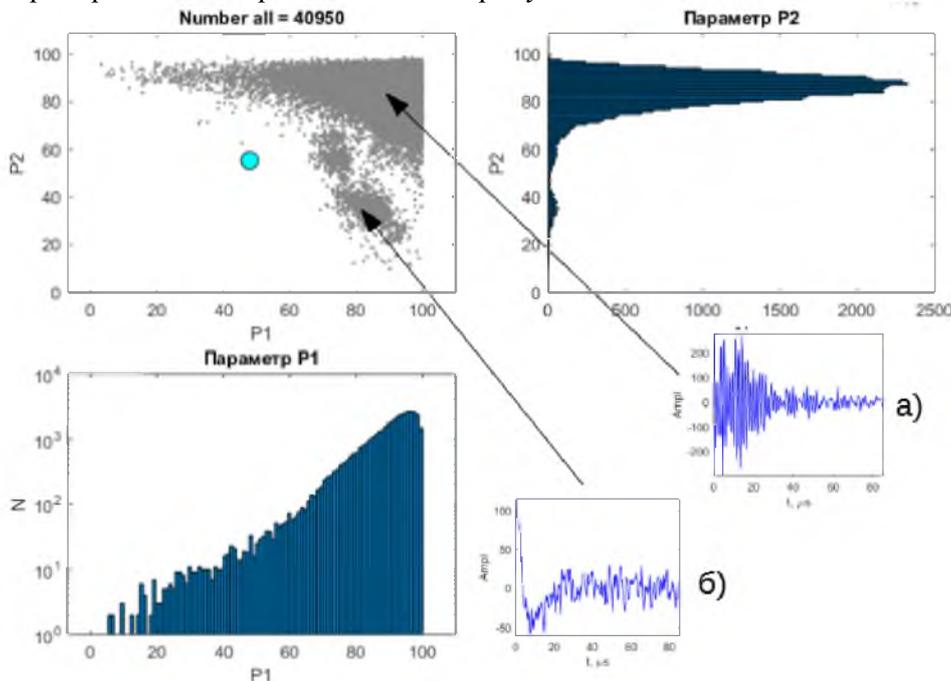


Рис. 4. Диаграмма рассеивания параметров P_1 и P_2 и их гистограммы распределения.
а) кластер, содержащий полезные сигналы, б) кластеры, содержащие - шумы

Согласно гистограммам и виду волновой формы, полезные сигналы группируются в верхнем правом углу диаграммы рассеивания. Это означает, что для полезного сигнала характерно: во-первых, концентрация мощности сигнала на начальном участке записи, во-вторых, малая амплитуда низкочастотных частотных компонент (до 200 кГц). Для выделения полезных сигналов на диаграмме рассеивания использовался полигон, задаваемый оператором вручную, по параметру P_2 в диапазоне от 60 до 100, а по параметру P_1 в диапазоне от 50 до 100, исключая области с шумовыми акустоэмиссионными сигналами (рис.5).

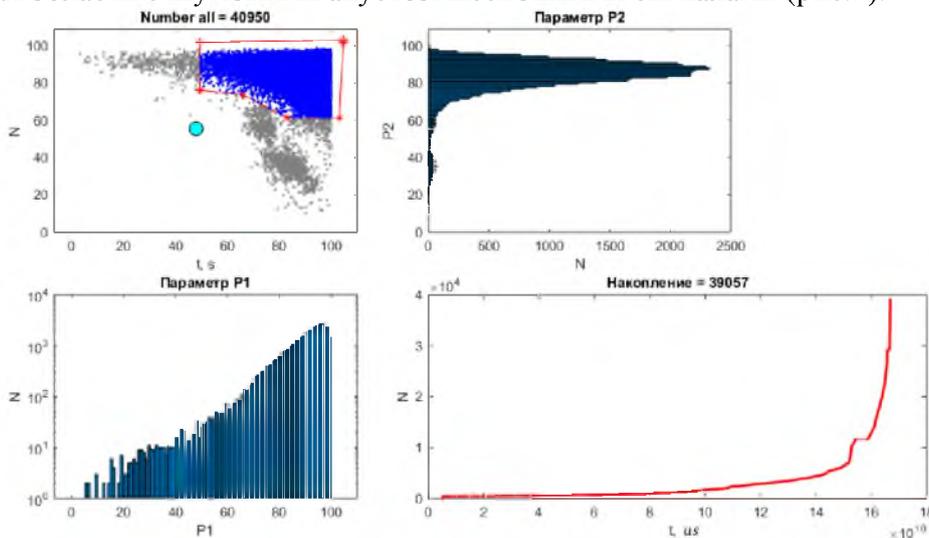


Рис. 5. Накопление сигналов АЭ от времени только полезных сигналов

На основе выделенных полезных сигналов строится график накопления событий акустической эмиссии. График накопления показывает, что на этапе уплотнения (до $15 \cdot 10^{10}$ мкс), количество сигналов акустической эмиссии сравнительно мало и составляет 15-20% от общего количества сигналов, с последующим резким увеличением количества событий, что является признаком разуплотнения и перехода к разрушению образца геоматериала [9].

Выводы. Анализ волновых форм сигналов акустической эмиссии показал, что они распределяются на три основных группы: полезные сигналы, шумы и их комбинация. Волновая форма полезных сигналов характеризуется начальным участком (до ~ 40 мкс), на который приходится большая часть мощности сигнала и содержащий всплеск, с последующим затуханием. Комбинированные сигналы представляют собой сложение низкочастотной шумовой составляющей и низкоамплитудного полезного сигнала. Шумовые сигналы характеризуются отсутствием четкой волновой формы, характерной для акустического отклика на деформацию, а также частотным спектром, имеющим равномерный вид или представленный, в основном, низкочастотными составляющими. Диаграмма рассеивания, построенная на основе параметров P_1 и P_2 , демонстрирует распределение сигналов акустической эмиссии по кластерам, которые соответствуют полезным и шумовым сигналам. Выборка полезных сигналов по диаграмме рассеивания производится выделением соответствующей области согласно гистограммам с помощью полигона. Для автоматизации процесса необходимо дальнейшее развитие методики, в направлении выделения полезных волновых форм используя методы кластерного анализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9)

Список литературы

1. Закупин А. С., Богомолов Л. М., Мубассарова В. А., Ильичев П. В. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне // *Физика земли*. 2014. № 5. С. 105–120.
2. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // *Физика Земли*. 2012. № 7–8. С. 63–88.
3. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Гаврилов В.А. Сравнение результатов скважинных геоакустических измерений с данными лабораторных и натуральных экспериментов по электромагнитному воздействию на горные породы // *Физика земли*. 2011. № 11. С. 63–74.
4. Имашев С.А., Сычев В.Н. Оценка возможностей применения методов фрактального анализа для исследования геофизических данных. Часть 2. Фрактальный анализ сейсмосигнала // *Вестник КРСУ*. 2017. Т. 17. № 5. С. 78-82.
5. Lockner D. The role of acoustic emissions in the study of rock fracture // *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*. 1993. Vol. 7. P. 883–899.
6. Niccolini G., Carpinteri A., Lacidogna G., Manuello A. Acoustic emission monitoring of the Syracuse Athena temple: scale invariance in the timing of ruptures // *Phys Rev Lett*. 2011. 106:108503.
7. Carpinteri A., Lacidogna G., Accornero F. Fluctuations of $1/f$ Noise in Damaging Structures Analyzed by Acoustic Emission // *Applied Sciences*. 2018. 8. № 9. С. 1685.
8. Закупин А.С., Боровский Б.В. Пат. 2012148683/28 РФ. Рычажная установка для статических и динамических испытаний материалов в условиях одноосного сжатия // *БИ*. 2015. - №5.
9. Мубассарова В.А. Влияние электромагнитных полей на скорость деформации и дефектообразование в нагруженных образцах горных пород: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 25.00.10 // *ФГБУН Институт динамики геосфер РАН*. М., 2019. 202 с.

Известия КГТУ им. И.Раззакова 50/2019

10. Гилат А. Matlab. Теория и практика // ДМК Пресс, 2016. 461 с. ISBN: 978-5-97060-183-9