

УДК 622.838; 51.622; 831.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

к.т.н. Спожакин А.И. (ИФГП НАН Украины),
инж. Бакаев О.В. (ДГТУ)

Експериментально встановлений зв'язок між електромагнітним і сейсмоакустичним випромінюванням при одноосному стисненні зразків гірських порід і отримані кореляційні залежності. Вивчені спектри випромінювання електромагнітної емісії. Приведені параметри апаратури і методика експерименту.

**EXPERIMENTAL STUDY OF ELECTROMAGNETIC
AND ACOUSTICAL EMISSION DURING DEFORMATION
OF ROCKS SPECIMENS**

Spozhakin A.I., Bakayev O.V.

The relation is established and correlation relationships are derived between electromagnetic and acoustic emissions arising during uniaxial compression of rocks specimens. Electromagnetic emission spectra are investigated. Instrumentation values and experimental techniques are presented.

Известно, что рядом авторов [1–3] проводились исследования, направленные на изучение связи между структурными перестройками в горном массиве и особенностями электромагнитного излучения (ЭМИ) и сейсмоакустической эмиссии (АЭ) при этом.

Однако практически в большинстве библиографических источников не приводятся ни теоретические, ни экспериментальные характеристики электромагнитных спектров.

В данной статье предпринята попытка изучить степень связи ЭМИ и АЭ, возникающими при одноосном сжатии некоторых образцов горных пород и получить спектры электромагнитного излучения.

Для этого была разработана и создана экспериментальная установка для исследования электромагнитного и акустического излучения, возникающего при деформации образцов горных пород, которая приведена на рис. 1. и представляет собой четыре автономных канала со своими датчиками:

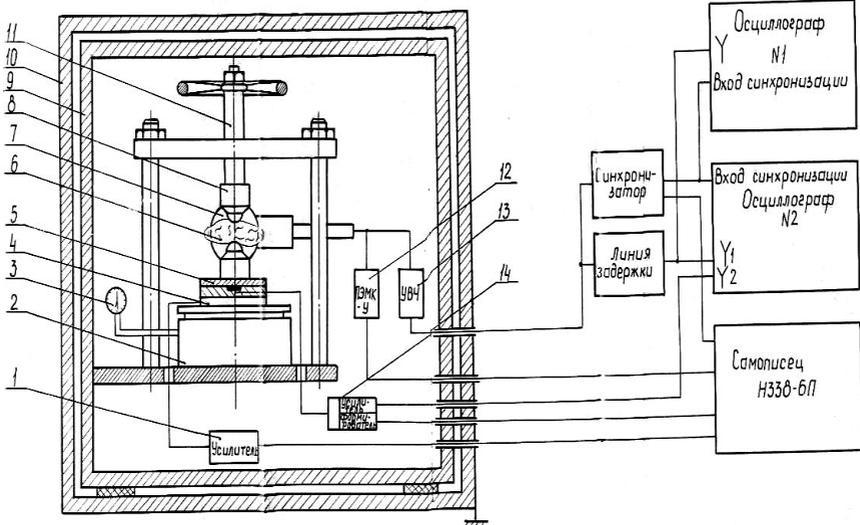


Рис. 1. Схема установки для изучения и регистрации акустической эмиссии и электромагнитного излучения при одноосном сжатии: 1 – Электронный усилитель датчика давления; 2 – Пресс; 3 – Манометр; 4 – Датчик давления; 5 – Сейсмоакустический датчик; 6 – Исследуемый образец; 7 – Дипольная измерительная антенна; 8 – Индентор; 9,10 – Металлические экраны; 11 – Фиксатор; 12 – Узкополосный приемник ЭМИ; 13 – Широкополосный усилитель ВЧ; 14 – Усилитель и формирователь сейсмоакустического сигнала.

- широкополосной канал регистрации ЭМИ;
- узкополосной канал регистрации ЭМИ;
- канал регистрации акустической эмиссии;
- канал регистрации напряжений в образце.

С целью уменьшения финансовых и трудовых затрат, а также времени затраченного на исследования, нагружение проводилось по методике, разработанной ВНИМИ для образцов горной породы произвольной формы, в том числе и неправильной, встречно и соосно направленными сферическими инденторами.

Известно, что усилие в 70 кН (7 тс) способно производить раскалывание пород любой крепости при площади раскола до 15–18 см², поэтому в качестве исполнительской машины использовался гидравлический пресс ПГЛ-5 вертикального сжатия. Через стальные сферические инденторы диаметром $15 \pm 0,05$ мм и твердостью HRC 60 – 65 пресс обеспечивал строго соосно приложение нагрузок к образцу.

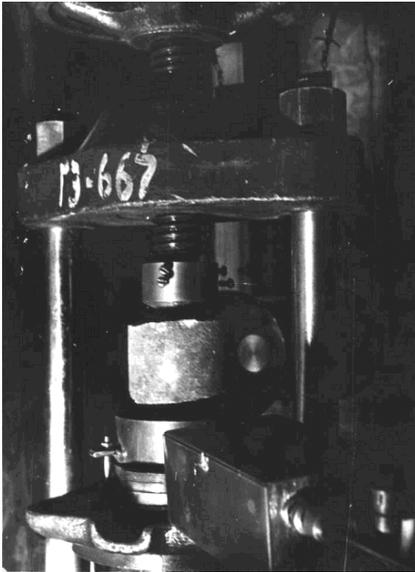


Рис. 2. Расположение гидравлического пресса и датчиков внутри электромагнитной камеры

Датчики с предварительными устройствами обработки информации и гидравлический пресс, (рис. 2), помещены в защитный двойной электромагнитный экран, который выполнен из стального листа толщиной 3 мм, ослабляющий внешнее электромагнитное поле более чем на 200 дБ в диапазоне частот от 10 Гц до 100 МГц. Размеры внутренней камеры 2000x2000x1700 мм.

Приборы регистрации и обработки сигналов установлены за внешним экраном (рис. 3.) Соединение датчиков и приборов регистрации осуществляется через специальные коаксиальные вводы, согласованные на нагрузку 50 Ом.

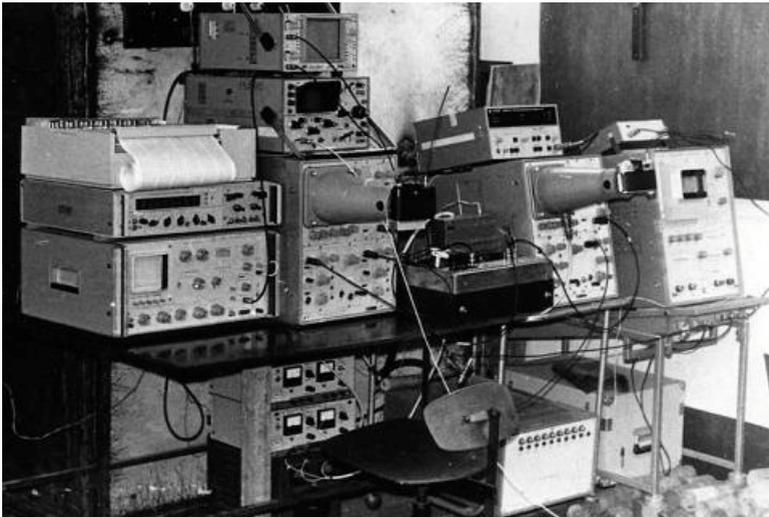


Рис. 3. Внешний вид установки

Широкополосный канал регистрации ЭМИ состоит из широкополосной пеленгационной измерительной антенны, широкополосного высокочастотного усилителя, формирователя. Блок синхронизации и линия задержки вынесены за пределы экрана.

Электрическая составляющая электромагнитного излучения преобразуется широкополосной измерительной антенной в электрический сигнал и усиливается высокочастотным усилителем типа УЗ-33 до напряжений достаточных для регистрации осциллограмм на двух запоминающих осциллографах с разными длительностями разверток.

Предварительные исследования деформации горных пород показали, что возникающей акустической эмиссии предшествует электромагнитная, поэтому запуск лучей обеих осциллографов осуществлялся синхроимпульсами, которые формировались передним фронтом осцилляции ЭМИ при помощи формирователя.

Синхроимпульсы нормированной амплитуды и длительности поступали также на самописец Н-399-6, где и фиксировались как импульсы широкополосного приемника.

Сигнал ЭМИ задерживался линией задержки относительно синхроимпульса, что позволило исследовать начало осцилляции ЭМИ параллельно с акустическим сигналом.

При выборе типа антенны была взята конструкция, в основу которой положен тот факт, что у большинства электронных приборов в диапазоне частот до 100 МГц, входное сопротивление имеет емкостной характер. Емкостной характер имеет и выходное сопротивление короткого электрического вибратора. Таким образом, входное сопротивление антенного усилителя образует с выходным сопротивлением короткого электрического вибратора частотно-независимый емкостной делитель. В результате чего калибровочный коэффициент антенны постоянен в широкой полосе частот.

Для увеличения емкости вибратора и, как следствие, увеличения калибровочного коэффициента, связывающего величину измеряемого электрического поля с напряжением на выходе антенны, используются короткие конические вибраторы. Регистрация ЭМИ в широкополосном канале осуществлялась в полосе частот 0,05–30 МГц. Структурная схема широкополосной антенны приведена на рис. 4.

Узкополосный канал регистрации ЭМИ состоит из той же дипольной измерительной антенны, что и у широкополосного канала и перестраиваемого узкополосного приемника. Узкополосный приемник, после предварительных испытаний, был настроен на резонанс-

ную частоту 700 кГц. Сигнал с детектора поступал на формирователь, который формировал импульсы нормированной амплитуды и длительности, а с формирователя на самописец. Структурная схема узкополосного приемника ЭМИ приведена на рис. 5.

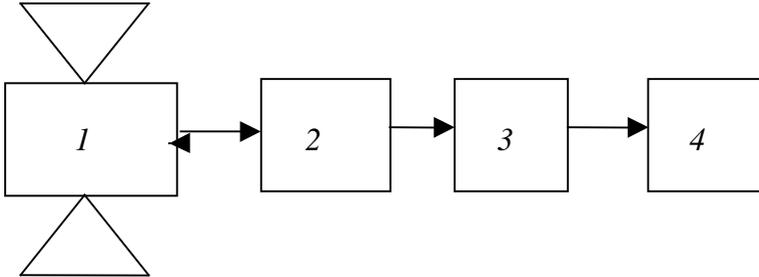


Рис. 4. Структурная схема широкополосной антенны: 1 – Широкополосная измерительная пеленгационная антенна; 2 – Полосовой фильтр; 3 – Усилитель высокой частоты; 4 – Согласующее устройство

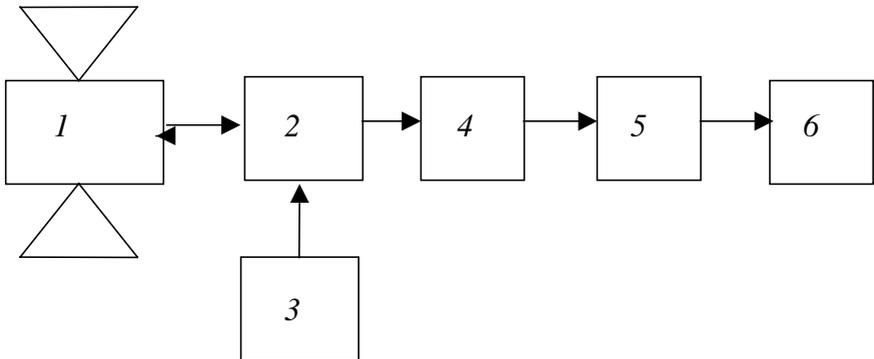


Рис. 5. Структурная схема узкополосного приемника ПЭМИШ-6Р: 1 – Широкополосная измерительная пеленгационная антенна; 2 – Смеситель; 3 – Гетеродин; 4 – ФНЧ; 5 – УНЧ; 6 – Нормализатор

Канал регистрации акустической эмиссии состоит из пьезодатчика, повторителя, усилителя, формирователя с нормализатором.

Сигнал акустической эмиссии с пьезодатчика, установленного в центре плиты шарового индентора поступает на истоковый повторитель и далее на два устройства. Первое устройство представляет собой широкополосный усилитель, а второе формирователь с нормализатором.

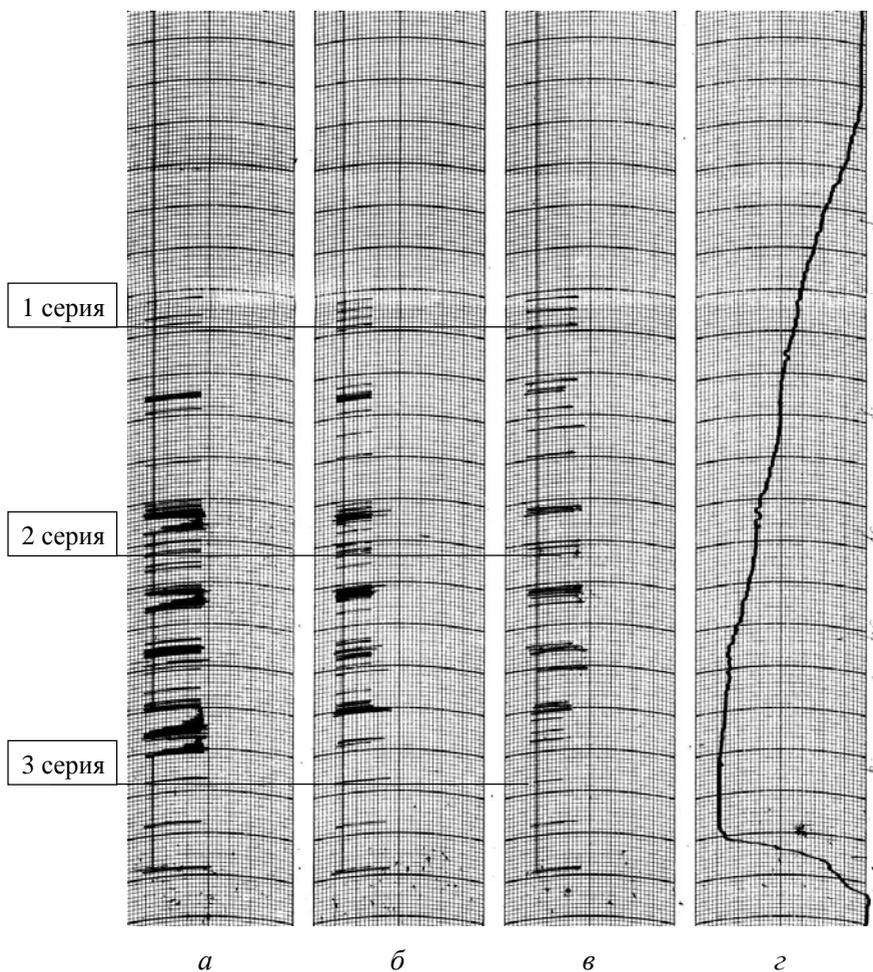


Рис. 6. Динамика регистрации акустической эмиссии и электромагнитного излучения при деформации образца песчаника мелкозернистого (кern \varnothing 62 мм): *а* – импульсы узкополосного приемника ЭМИ, $F_{\text{рез}} = 700$ кГц, $\Delta F = 3$ кГц; *б* – импульсы широкополосного приемника ЭМИ, $\Delta F = 0,1\text{--}30$ МГц; *в* – импульсы акустической эмиссии; *г* – давление на шаровых инденторах, разрешение 240 кПа/мм. Скорость протяжки ленты самописца – 10 мм/с

Усиленный сигнал с выхода усилителя поступает на второй канал осциллографа, где синхронно с ЭМИ регистрируются на экране.

Для регистрации давления использовался электрический манометр ДВ-200.

Динамика регистрации акустической эмиссии и электромагнитного излучения при деформации некоторых пород приведена на диаграммах самописца (рис. 6; рис. 13), а осциллограммы АЭ и ЭМИ различных серий представлены на (рис. 7–12; рис. 14–19).

**Осциллограммы акустической эмиссии и электромагнитного излучения при деформации образца песчаника мелкозернистого.
Керн \varnothing 62 мм. Первая серия импульсов.**

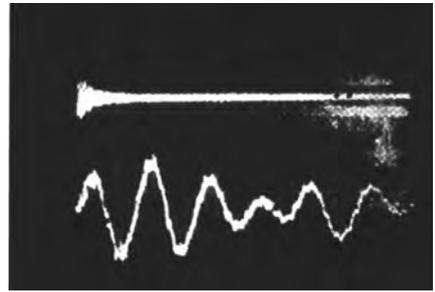
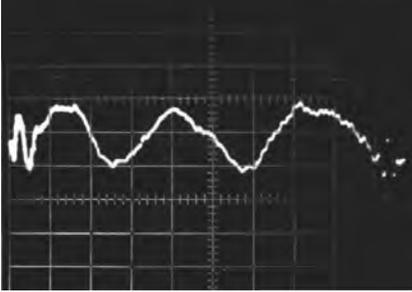


Рис. 7. Осциллограмма электромагнитного излучения: длительность развертки – 0,5 мкс/дел; амплитуда – 25 мВ/дел

Рис. 8. Осциллограммы электромагнитного излучения и акустической эмиссии. Канал ЭМИ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел. Канал АЭ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 2 В/дел

**Осциллограммы акустической эмиссии и электромагнитного излучения при деформации образца песчаника мелкозернистого.
Керн \varnothing 62 мм. Вторая серия импульсов.**

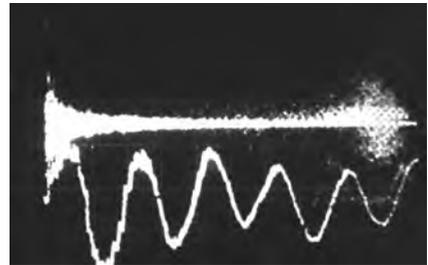
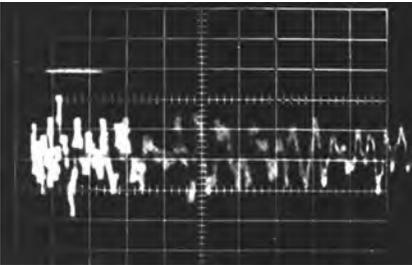


Рис. 9. Осциллограмма электромагнитного излучения: длительность развертки – 0,5 мкс/дел; амплитуда – 25 мВ/дел.

Рис. 10. Осциллограммы электромагнитного излучения и акустической эмиссии. Канал ЭМИ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел. Канал АЭ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 2 В/дел

Осциллограммы акустической эмиссии и электромагнитного излучения при деформации образца песчаника мелкозернистого. Керна \varnothing 62 мм. Третья серия импульсов.

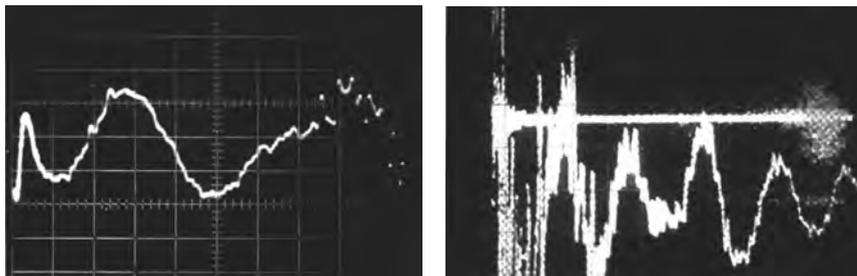


Рис. 11. Осциллограмма электромагнитного излучения: длительность развертки – 0,5 мкс/дел; амплитуда – 25 мВ/дел.

Рис. 12. Осциллограммы электромагнитного излучения и акустической эмиссии. Канал ЭМИ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел. Канал АЭ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 2 В/дел

Для того чтобы изучить диапазон частот, на которых излучается основная часть энергии при деформации горных пород, была разработана программа обработки осциллограмм. Спектр частот сигнала получили путем разложения графика осциллограммы в ряд Фурье, воспользовавшись математическим пакетом MathCad. Спектры для двух горных пород различных серий (гранит украинский и песчаник мелкозернистый) представлены на рис. 18 и рис. 19, соответственно.

Таким образом проведенные исследования позволили установить связь между АЭ и ЭМИ при структурных перестройках в исследуемых образцах, а также изучить спектры излучения для различных горных пород.

В результате исследований установлено, что:

- интенсивность АЭ и ЭМИ растет с ростом деформационных нагрузок на горную породу;
- коэффициент корреляции между АЭ и ЭМИ для различных горных пород находится в пределах 0,75–0,86;
- спектр излучения ЭМИ для различных горных пород находится в пределах 0,05–3,2 МГц.

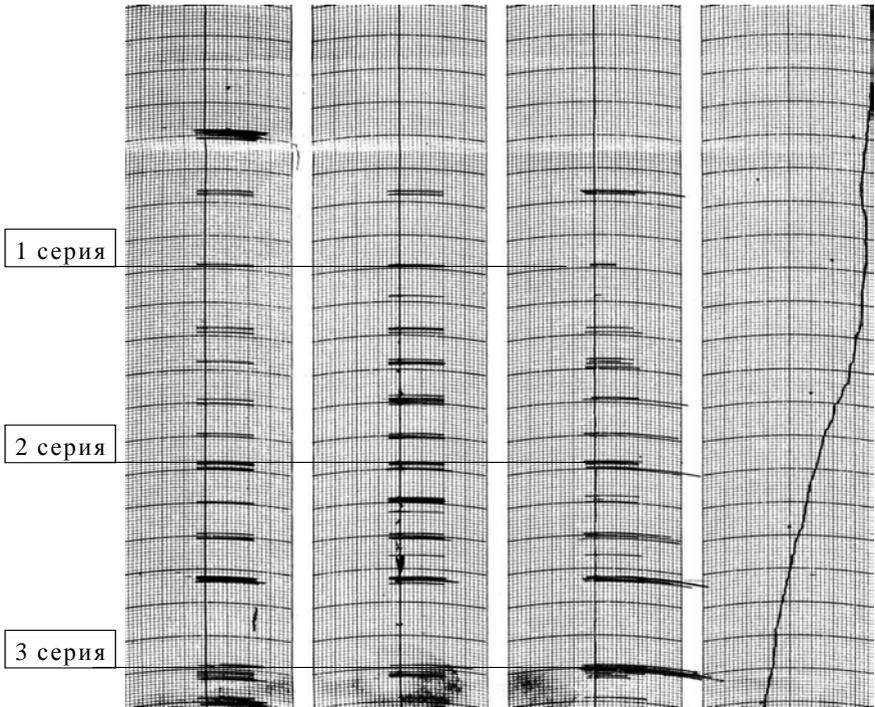


Рис. 13. Динамика регистрации акустической эмиссии и электромагнитного излучения при деформации образца гранита украинского (образец неправильной формы): *a* – импульсы узкополосного приемника ЭМИ, $F_{\text{рез}} = 1 \text{ МГц}$, $\Delta F = 3 \text{ кГц}$; *b* – импульсы широкополосного приемника ЭМИ, $\Delta F = 0,1\text{--}30 \text{ МГц}$; *в* – импульсы акустической эмиссии; *г* – давление на шаровых инденторах, разрешение 240 кПа/мм . Скорость протяжки ленты самописца – 10 мм/с

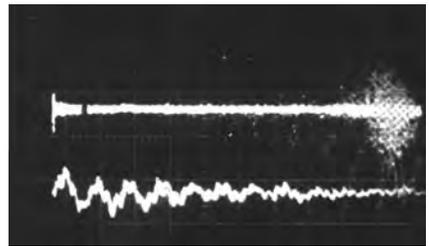
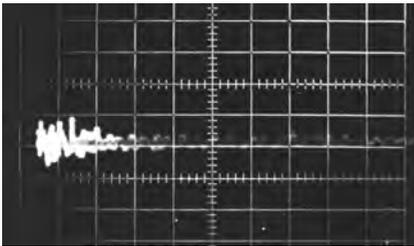


Рис. 14. Осциллограмма электромагнитного излучения: длительность развертки – 5 мкс/дел ; амплитуда – 100 мВ/дел .

Рис. 15. Осциллограммы электромагнитного излучения и акустической эмиссии. Канал ЭМИ: длительность развертки – 250 мкс/дел ; амплитуда – 100 мВ/дел . Канал АЭ: длительность развертки – 250 мкс/дел ; амплитуда – 2 В/дел

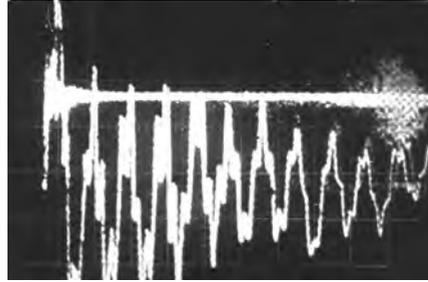
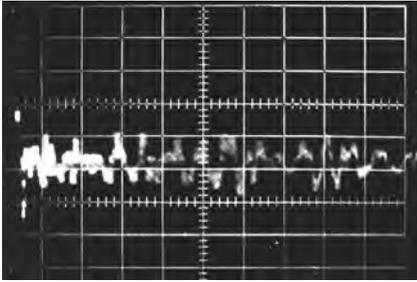


Рис. 16. Осциллограмма электромагнитного излучения: длительность развертки – 5 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел.

Рис. 17. Осциллограммы электромагнитного излучения и акустической эмиссии. Канал ЭМИ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел. Канал АЭ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 2 В/дел

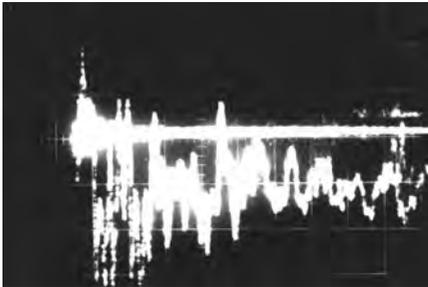
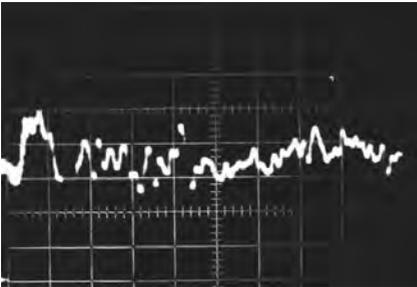


Рис. 18. Осциллограмма электромагнитного излучения: длительность развертки – 5 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел.

Рис. 19. Осциллограммы электромагнитного излучения и акустической эмиссии. Канал ЭМИ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 100 мВ/дел. Канал АЭ: длительность развертки – 250 мкс/дел; амплитуда – 2 В/дел

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спожакин А.И., Бакаев О.В. Определение напряженного состояния массива горной выработки // Фізико-технічні проблеми гірничного виробництва / Під загальною редакцією А.Д. Алексеєва.– Донецьк: Інститутгірничих процесів НАН України, 2005.– С.179–185.
2. Акустическая эмиссия и электромагнитное излучение при одноосном сжатии. Гончаров А.И., Корявов В.П. и др. // ДАН СССР.– 1980.– Т.55, №4.– С.821–824.– Библ.:9.

3. Яковицкая Г.Е. Электромагнитные сигналы при статическом нагружении образцов горных пород \ М.В. Курленя, М.М. Пынзырь, Г.Е. Яковицкая // ФТПРПИ.– 2002.– №1.– С.22.