

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**УДК 622.235(088): 512.21**

**Д. В. Алексеев, П.В. Егоров, А. А. Мальшин**

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО И СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГОРНЫХ ПОРОД

Для описания накопления повреждений в материалах и прогнозирования процесса разрушения часто используются модели марковских процессов [1-3]. В работах [4-6] на основе исследования импульсной электромагнитной эмиссии при разрушении горных пород было показано, что кинетический процесс накопления повреждений нельзя считать марковским процессом.

Целью настоящей работы является дальнейшее исследование статистических характеристик случайных процессов накопления повреждений при разрушении горных пород на основе одновременной регистрации импульсной эмиссии в световом и радио диапазонах с одного и того же нагружаемого образца.

#### **Поток импульсов эмиссии как случайный процесс**

Число импульсов эмиссии при разрушении, как электромагнитной, так и световой, является случайной величиной. Одним из способов исследования случайного процесса является измерение его числовых характеристик в различные моменты времени [7]. Простейшими числовыми характеристиками случайного процесса являются среднее значение и дисперсия. Для их вычисления необходимо провести усреднение по реализациям случайного процесса.

Поскольку в экспериментах по исследованию импульсной

эмиссии при разрушении горных пород, образец в процессе проведения эксперимента разрушается, единственным способом проведения усреднения по реализациям случайного процесса является усреднение измеряемых характеристик по серии испытуемых образцов из одной партии. В результате процесс измерения числовых характеристик случайного процесса сводится к следующей схеме.

➤ Кинетическая кривая накопления импульсов эмиссии полученная на конкретном образце рассматривается как отдельная реализация случайного процесса.

➤ Кинетические кривые, полученные от различных образцов одной партии, рассматриваются как различные реализации одного и того же случайного процесса.

➤ Усреднение по реализациям случайного процесса проводится как усреднение результатов измерения по образцам из одной партии.

После определения описанным способом числовых характеристик случайного процесса импульсной эмиссии, можно исследовать взаимосвязь между полученными числовыми характеристиками и на ее основе сделать выводы о характере исследуемого случайного процесса.

Одной из отличительных черт марковских процессов является прямая пропорциональность между средним значением и дисперсией (квадратом стан-

дартного отклонения) случайного процесса [8, 9]. Проиллюстрируем это на примере двух хорошо известных моделей марковских процессов, дрейфовой диффузии и нестационарного пуассоновского процесса.

В случае одномерной дрейфовой диффузии измеряемой случайной величиной является координата диффундирующей частицы  $\hat{x}(t)$ , среднее значение координаты  $\langle x(t) \rangle = \mu t$  определяется дрейфовой скоростью  $\mu$ , а дисперсия координаты  $D[\hat{x}(t)] = \langle (\hat{x}(t) - \mu t)^2 \rangle = Dt$  коэффициентом диффузии  $D$ . Из этих формул видно, что дисперсия и среднее значение координаты частицы связаны прямой пропорциональной зависимостью

$$D[\hat{x}(t)] = (D/\mu) \langle (\hat{x}(t)) \rangle.$$

В случае нестационарного пуассоновского процесса измеряемой случайной величиной является число событий  $\hat{N}(t)$ , произошедших к рассматриваемому моменту времени. Распределение вероятности числа событий имеет вид

$$P(N) = \frac{\Lambda^N(t)}{N!} \exp(-\Lambda(t)).$$

При этом среднее значение и дисперсия числа событий равны параметру этого распределения

$\langle \hat{N}(t) \rangle = D[\hat{N}(t)] = \Lambda(t)$ , то есть дисперсия и среднее значение числа событий в нестационарном пуассоновском процессе связаны прямой про-

порциональной зависимостью.

Таким образом, характер случайного процесса импульсной эмиссии можно определять на основе исследования зависимостей между средним значением и дисперсией числа импульсов.

Если процесс импульсной эмиссии является марковским, то между временными зависимостями среднего  $\langle \hat{N}(t) \rangle$  и дисперсии  $D[\hat{N}(t)]$  числа должна иметь место статистически значимая линейная зависимость. И напротив, статистически значимые отклонения от линейной зависимости между средним значением и дисперсией будут говорить против того, что исследуемый процесс является марковским.

### *Измерение потока импульсов*

В настоящей работе были исследованы потоки импульсов световой и электромагнитной эмиссии при нагружении таких разнообразных горных пород как: мраморизованный доломит, кальцитизированный мраморизованный доломит, метасоматическая карбонатная порода, кварц-олигоклаз-пироксеновый роговик, кварцевый роговик, плагиогранит, кварцевый диорит, гранодиорит.

Измерение потоков импульсов эмиссии проводилось на лабораторной установке, блок схема которой приведена на рис. 1 [10]. При этом, в отличие от других работ по исследованию импульсной эмиссии нагруженных горных пород, проводилась одновременная регистрация импульсов электромагнитной и световой эмиссии на протяжении всего цикла испытания, - от начала нагружения до раскола образца магистральной трещиной.

Измеряемыми характеристиками на выходе системы являлись временные зависимости числа накопленных импульсов электромагнитной и световой эмиссии.

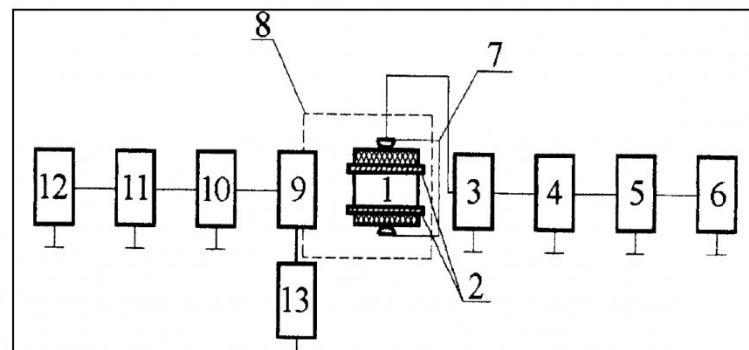
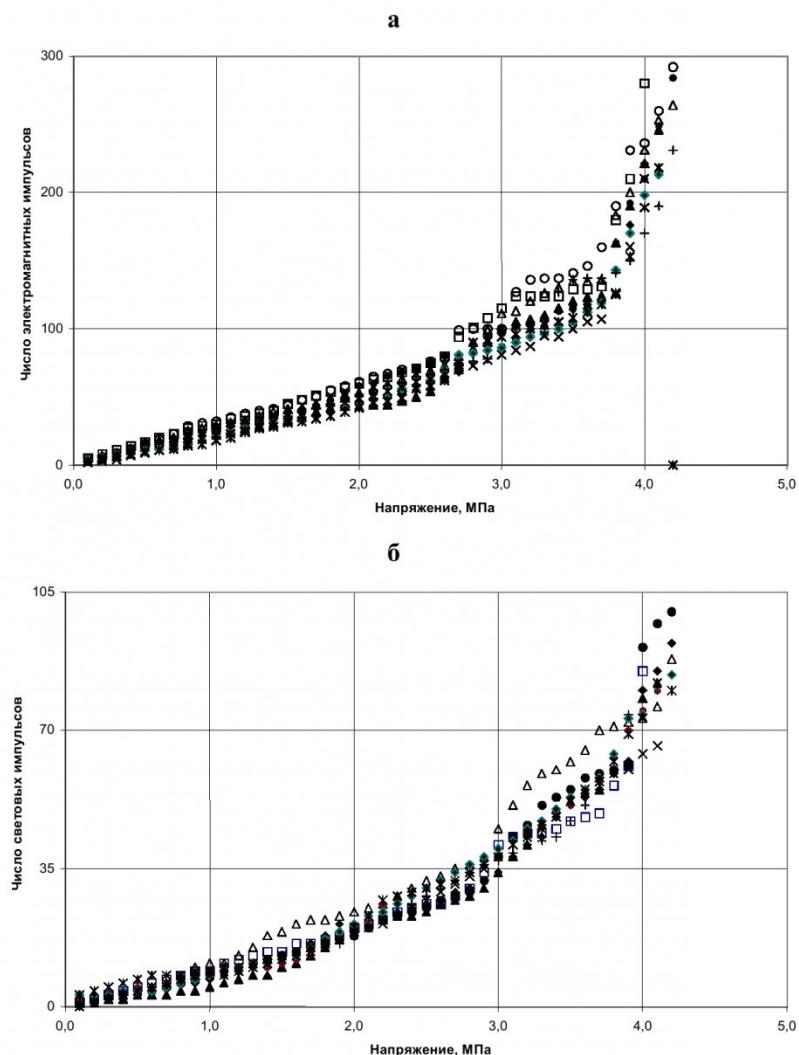


Рис. 1. Блок-схема установки: 1 - образец; 2 - антенны; 3,10 - усилитель УЗ-29; 4 фильтр низких частот; 5,11 - частотомер ЧЗ-54; 6,12 - осциллограф С8-12; 7 - нагружающее устройство; 8 - светозащитный кожух; 9 - ФЭУ -83; 13 - источник питания ВС-22

Поскольку нагружение образцов осуществлялось в режиме линейного роста напряжений

$\sigma(t) = t\dot{\sigma}$ , исследуемые кинетические кривые накопления



*Рис. 2. Кинетические кривые накопления электромагнитных (а) и световых импульсов (б) для кварцевого диорита. Разными маркерами обозначено число импульсов от десяти различных образцов из одной исследуемой партии*

импульсов световой и электромагнитной эмиссии удобно было строить, используя вместо временной координаты текущее значение напряжения. Примеры типичных кинетических кривых накопления импульсов электромагнитной и световой эмиссии для десяти реализаций случайного процесса приведены на рис. 2(а,б), из которого видно, что максимальное число электромагнитных импульсов примерно в три раза превосходит максимальное число световых импульсов при нагружении одного и того же образца кварцевого диорита.

Подобные кинетические зависимости накопления импульсов наблюдались и при нагружении других исследованных горных породах.

Обработка кинетических зависимостей производилась при помощи статистических функций электронных таблиц Excel 97.

#### Числовые характеристики потока импульсов

Для получения числовых характеристик случайных процессов накопления импульсов, среднего значения и дисперсии, было проведено статистическое усреднение кинетических зависимостей накопления импульсов эмиссии по десяти реализациям случайного процесса.

В качестве отдельных реализаций случайного процесса использовались кинетические кривые накопления импульсов, полученные при идентичных режимах нагружения на десяти образцах из одной партии.

Путём усреднения по реализациям случайного процесса вычислялись среднее значение  $\langle \hat{N}(\sigma) \rangle$  и стандартное отклонение

$$S[\hat{N}(\sigma)] = \sqrt{\langle \hat{N}^2(\sigma) \rangle - \langle \hat{N}(\sigma) \rangle^2}$$

числа импульсов для каждого текущего значения напряжения. Поскольку различные образцы

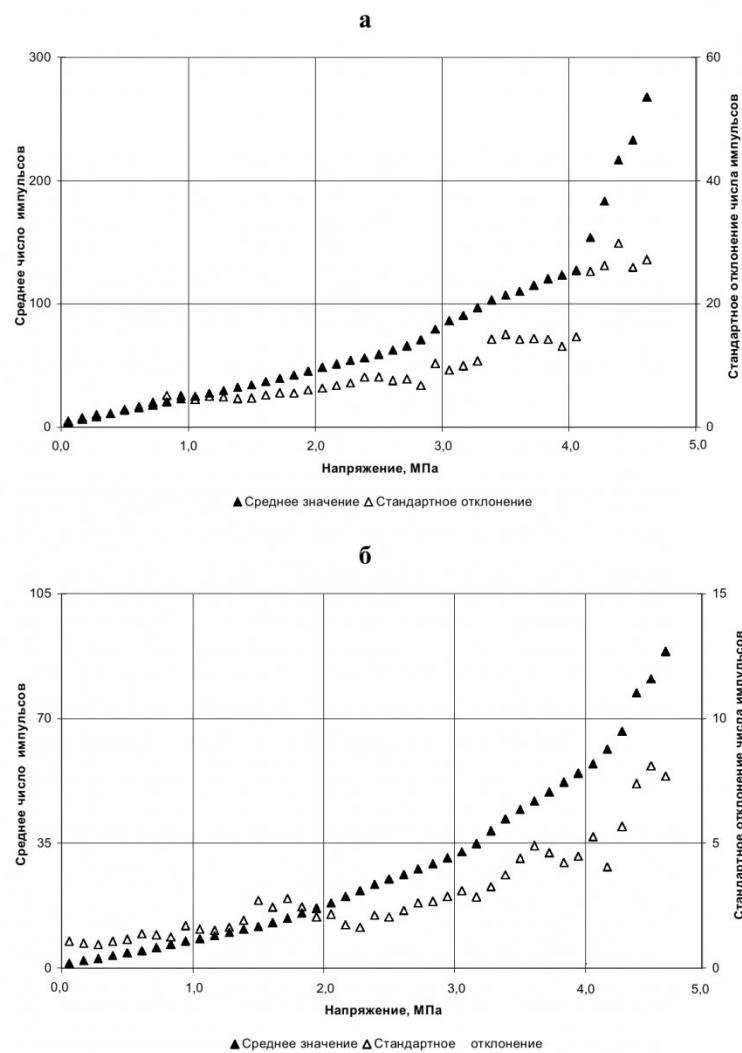


Рис. 3. Кинетические зависимости среднего значения и стандартного отклонения числа электромагнитных (а) и световых импульсов (б) для кварцевого диорита

из одной партии разрушались при различных напряжениях,

для осуществления усреднения случайного процесса по всем

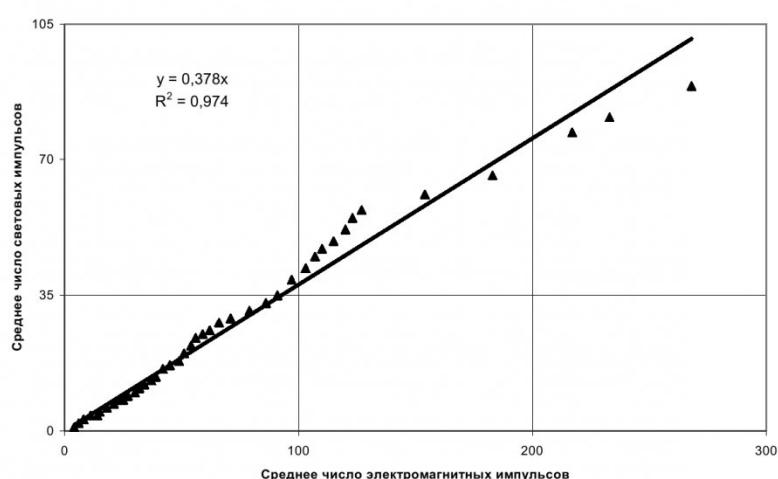


Рис. 4. Корреляционная связь между средними значениями числа электромагнитных и световых импульсов для кварцевого диорита

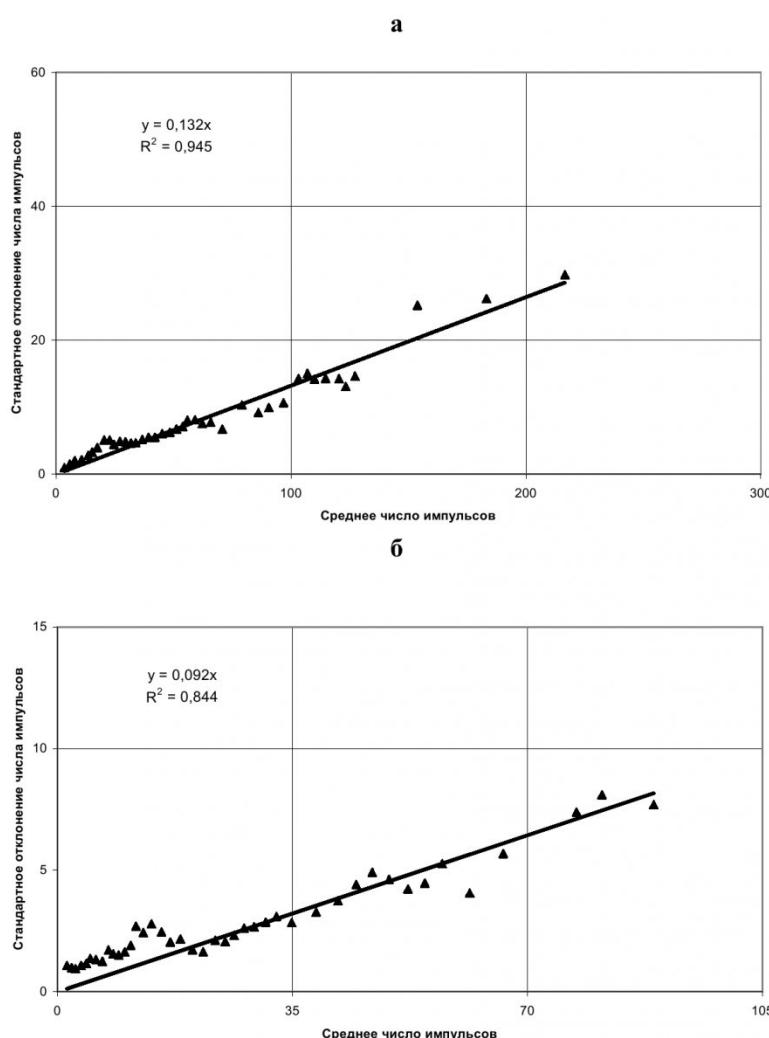


Рис. 5. Корреляционная связь между средним значением и стандартным отклонением числа электромагнитных (а) и световых (б) импульсов для кварцевого диорита

десяти реализациям кинетические кривые «укорачивались»

по оси напряжений до разрушающего напряжения наименее

прочного образца из исследуемой партии.

Примеры получаемых путём усреднения по реализациям зависимостей среднего значения и стандартного отклонения числа импульсов приведены на рис. 3(а, б). Далее по полученным зависимостям среднего значения и стандартного отклонения числа импульсов обоих случайных процессов строились корреляционные зависимости между средними значениями числа световых и электромагнитных импульсов (рис. 4), и между средним значением и стандартным отклонением числа электромагнитных импульсов (рис. 5а) и световых импульсов (рис. 5б). При этом на всех корреляционных зависимостях приведены значения коэффициента детерминации, зависимости определяемого как отношение суммы квадратов обусловленной регрессией к сумме квадратов разброса данных относительно среднего [7].

Как видно из рис. 4, между числом импульсов электромагнитной и световой эмиссии имеет место статистически значимая линейная зависимость. Это указывает на то, что кинетика импульсов как электромагнитной, так и световой эмиссии является отражением процесса накопления элементарных повреждений в нагружаемом об-

#### Коэффициенты детерминации линейных зависимостей

Горная порода	Корреляционная зависимость		
	Число световых импульсов – ЭМИ	Стандартное отклонение – среднее значение (свет)	Стандартное отклонение – среднее значение (ЭМИ)
Мраморизованный доломит	0,993	0,976	0,971
Кальцитизированный мраморизованный доломит	0,986	0,904	0,912
Метасоматическая карбонатная порода	0,979	0,895	0,907
Кварц-олигоклаз-пироксеновый роговик	0,965	0,889	0,904
Кварцевый роговик	0,979	0,913	0,894
Плагиогранит	0,984	0,936	0,923
Кварцевый диорит	0,976	0,925	0,947
Гранодиорит	0,982	0,909	0,933

разце.

Как видно из рис. 5(а, б), между стандартным отклонением и средним значением числа импульсов, как для световой, так и для и электромагнитной эмиссии, также имеет место линейная зависимость. При этом значение коэффициента детерминации для зависимости между стандартным отклонением и средним значением числа импульсов световой эмиссии несколько ниже, что можно объяснить малым числом световых импульсов на начальной стадии нагружении материала.

Аналогичные результаты получены и на других исследованных горных породах. Соответствующие значения коэффициентов детерминации полученных корреляционных зависимостей приведены в таблице.

Как видно из приведенных данных, для всех исследованных горных пород между стандартным отклонением и средним значением числа импульсов, а также средними значениями числа световых и электромагнитных импульсов имеет место статистически значимая линейная зависимость.

Поскольку для марковских случайных процессов должна наблюдаться линейная зависимость между средним значением и дисперсией числа импульсов, полученные результаты подтверждают сделанные в работах [4-6] выводы о том, что накопления элементарных повреждений в нагруженных материалах, нельзя считать марковским процессом.

## Выводы

1. На основе одновременной регистрации импульсной эмиссии в световом и радио диапазонах с одного и того же нагружаемого образца исследованы числовые характеристики случайных процессов световой и электромагнитной импульсной эмиссии горных пород.

2. Установлены статистически значимые линейные корреляционные зависимости между средними значениями числа световых и электромагнитных импульсов.

3. Установлена статистически значимая линейная зависимость между стандартным отклонением и средним значением числа электромагнитных и световых импульсов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // В кн. «Физические процессы в очагах землетрясений». - М.: Наука, 1980.- С.43-46.
2. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. Физические основы прогнозирования механического разрушения // ДАН СССР.- 1981.-т. 259.- № 6.- С.1350-1353.
3. Богданофф Д., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений. - М.: Мир, 1989. – 344 с.
4. Алексеев Д. В., Егоров П. В., Иванов В. В., Мальшин А. Н., Пимонов А. Г. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород// Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1993, №5, с. 45-49.
5. Алексеев Д. В., Егоров П. В. Персистентность накопления трещин при разрушении горных пород и концентрационный критерий разрушения// - Доклады РАН, 1993, т. 333, № 6, С.769-770.
6. Курлена М.В., Вострецов А.Г., Яковицкая Г.Е. Об одной модели сигналов электромагнитного излучения нагруженных горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1996, №3, С.9-17.
7. Справочник по прикладной статистике. - Под редакцией Э.Ллойда и У. Ледермана. - В двух томах. - М: Финансы и статистика, 1990. – Т. 1.- 510 с., Т. 2. -526 с.
8. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. - М.: Мир, 1984. Т. 1. – 578 с., Т. 2 – 787 с
9. Кайзер Дж. Статистическая термодинамика необратимых процессов. – М.: Мир, 1990. – 607 с.
10. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А. О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочно-галоидных кристаллов и горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1988, №1, С. 67-70.

□ Авторы статьи:

Алексеев  
Дмитрий Валентинович  
– докт. техн. наук, проф. каф. выс-  
шей математики

Егоров  
Пётр Васильевич  
- докт. техн. наук, проф., зав. каф.  
разработки месторождений  
полезных ископаемых  
подземным способом

Мальшин  
Анатолий Александрович  
- канд. техн. наук, доц.  
каф. физики