

5. Покатилов, А. В. Изменение физических свойств влагонасыщенных грунтов при электрохимическом упрочнении / А. В. Покатилов, С. М. Простов, В. А. Хямяляйнен, С. Л. Понасенко // ГИАБ. – 2005. – № 10. – С. 75–78.

6. Покатилов, А. В. Контроль изменения физико-механических и акустических свойств массива глинистых грунтов при электрохимическом закреплении / А. В. Покатилов, С. М. Простов // Вестн. КузГТУ. – 2006. №4. – С.10-15.

□ Авторы статьи:

Покатилов

Андрей Владимирович
– аспирант каф. теоретической и
геотехнической механики

Простов

Сергей Михайлович
– докт. техн. наук, проф. каф. теорети-
ческой и геотехнической механики

УДК 539.375+622.235

Г.А. Казунина, А.А. Мальшин

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ НАГРУЖЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ГОРНЫХ ПОРОД)

В работах [1 – 3] при помощи статистики нормированного размаха Херста для процессов импульсной электромагнитной и световой эмиссии нагруженных горных пород показано, что кинетика накопления импульсов эмиссии, характеризующая накопление микротрецин, является персистентным случайнym процессом (то есть процессом, поддерживающим в будущем тенденцию, наблюдавшуюся в прошлом). Хотя случайные процессы электромагнитной и световой импульсной эмиссии несут информацию о количестве микротрецин, образующихся в нагруженных материалах, в них не содержится информации о пространственном распределении микротрецин и их группировке в кластеры, которая принципиально важна с точки зрения прогнозирования момента макроскопического разрушения. Заметим, что с точки зрения эксперимента, получение информации о пространственном распределении микротрецин в непрозрачных материалах возможно только при помощи рассеяния рентгеновских лучей, что весьма затруднительно реализовать непосредственно в ходе динамического нагружения материала. В настоящее время только методы компьютерного моделирования предоставляют фактически

единственную возможность изучения кинетического процесса накопления элементарных повреждений и эволюции их кластерной структуры как единого процесса пространственно-временной эволюции распределенной динамической системы. Так в работах [4, 5], кинетика накопления элементарных исследовалась при помощи вероятностного клеточного автомата, реализованного на основе описанных в [6] объектных моделей алгоритмов роста кластеров Хаммерсли – Лиса – Александровица и многократной маркировки кластеров Хошена – Копельмана. Полученные в [4, 5] результаты позволили не только сравнить кинетический процесс накопления числа элементарных повреждений с кинетическим процессом изменения числа кластеров для различных сценариев моделирования, но и провести детальное сопоставление поведения статистики нормированного размаха Херста и корреляционных функций для этих случайных процессов. Последнее принципиально

важно потому, что зная сравнительное поведение статистических характеристик процессов накопления повреждений и эволюции их кластерной структуры, на основе полученных экспериментальных зависимостей статистики нормированного размаха Херста и корреляционных функций случайного потока импульсов эмиссии (световой или электромагнитной) можно сделать выводы о сценарии эволюции кластерной структуры элементарных повреждений. Целью настоящей работы является сравнение статистических характеристик случайного процесса накопления микротрецин, полученных в экспериментах по измерению электромагнитной эмиссии нагруженных горных пород, с результатами компьютерного моделирования эволюции кластерной структуры элементарных повреждений вероятностным клеточным автоматом [4, 5].

Моделирование эволюции кластерной структуры элементарных повреждений вероятностным клеточным автоматом

Таблица

Параметры моделирования

| Сценарий моделирования | p_{occ} | p_{spr} | p_{mer} | $\gamma\sigma_{av}/kT$ |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| Базовый однородный статический | 0.005 | 0.0002 | 0.0002 | 0.0001 |
| Однородный статический | 0.005 | 0.2 | 0.2 | 0.0001 |
| Внутренний динамический | 0.005 | 0.2 | 0.2 | 0.4 |
| Внешний динамический | 0.005 | 0.2 | 0.2 | 0.0001 |

проводилось на решетке размером 256×256 , а полученные выходные данные усреднялись по 10 реализациям моделируемого случайного процесса. Отдельная реализация случайного процесса эволюции ансамбля элементарных повреждений генерировалась при помощи дискретных временных шагов (циклов), в ходе которых по выбранному набору вероятностных правил происходили переходы клеток решетки в поврежденное состояние. Конечной стадией эволюции кластерной структуры элементарных повреждений была конфи-

гурация, в которой образуется кластер, соединяющий противоположные стороны решетки. Образование такого соединяющего кластера и интерпретировалось как разрушение блока, а число циклов, необходимое для образования соединяющего кластера отождествлялось со временем разрушения. Выходные данные моделирования, представленные в виде временных рядов, - реализации случайных процессов «число элементарных повреждений» и «число кластеров элементарных повреждений» использовались для вычисления различных характеристи-

стик этих случайных процессов, в том числе корреляционных функций и статистики нормированного размаха Херста. Для удобства сравнения данных, относящихся к различным режимам моделирования, использовались нормированные координаты: отношение числа циклов к полному числу циклов до появления соединяющего кластера T/T_{fin} . Характеристики рассмотренных сценариев моделирования приведены в таблице.

Здесь p_{occ} – вероятность образования нового элементарного повреждения, p_{spr} – вероят-

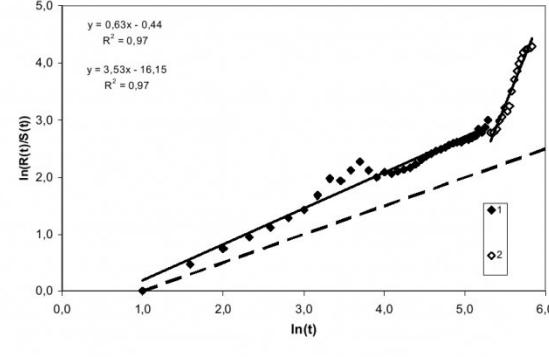
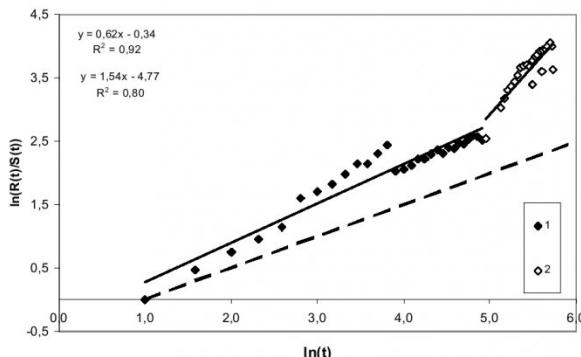
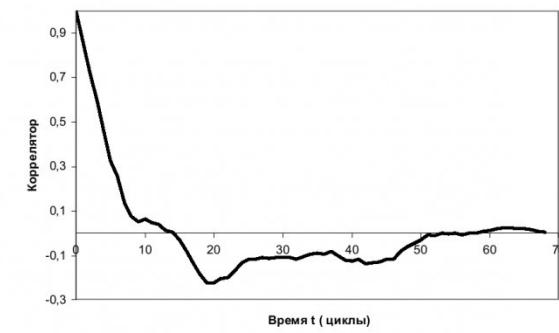
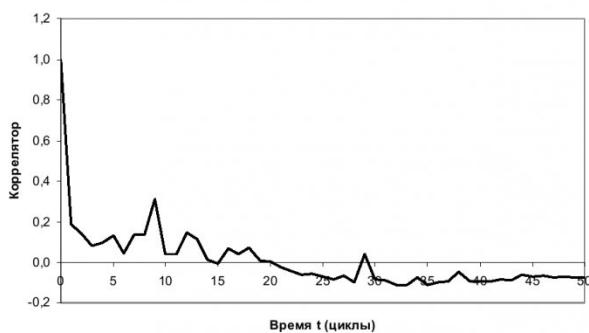
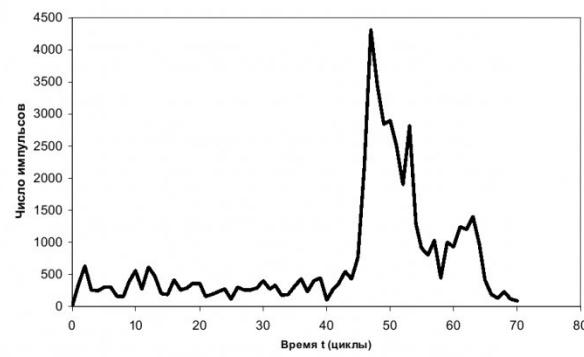
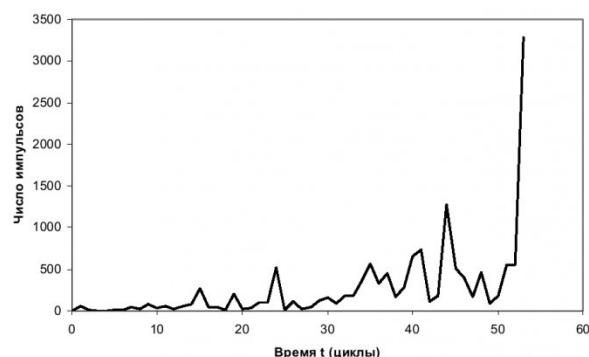


Рис. 1. Характеристики импульсной электромагнитной эмиссии для кварцевого диорита (образец 1): число импульсов (вверху), корреляционная функция и нормированный размах Херста (внизу)

Рис.2. Характеристики импульсной электромагнитной эмиссии для порфирита: число импульсов (вверху), корреляционная функция и нормированный размах Херста (внизу)

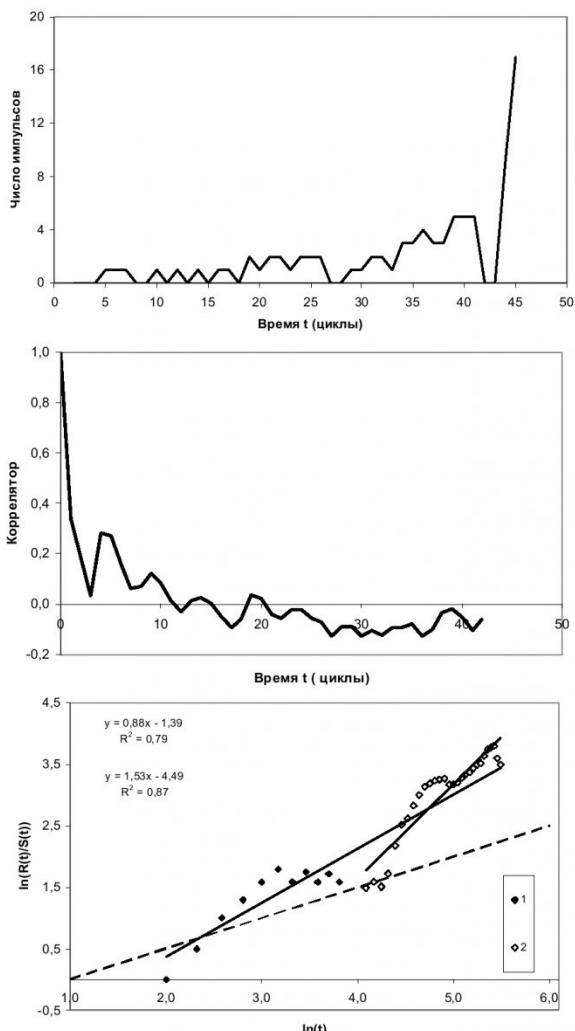


Рис.3. Характеристики импульсной электромагнитной эмиссии для известняка: число импульсов (вверху), корреляционная функция и нормированный размах Херста (внизу)

ность прорастания периметров кластеров повреждений, p_{mer} – вероятность слияния кластеров, сблизившихся на критическое расстояние, $\gamma\sigma_a/kT$ – параметр роста вероятности прорастания по периметру кластера повреждений в зависимости от его размера [5].

Экспериментальное измерение импульсной электромагнитной эмиссии было проведено на установке, описанной в [7], при нагружении таких горных пород как кварцевый диорит, порфирит, известняк. Выходные данные случайного потока электромагнитных импульсов распределялись по последовательным неперекрывающимся интервалам длительностью 50

секунд. Полное время до разрушения образцов составляло от нескольких минут при разру-

шении клином до 50 минут при плоском контакте нагружающего устройства с образцом.

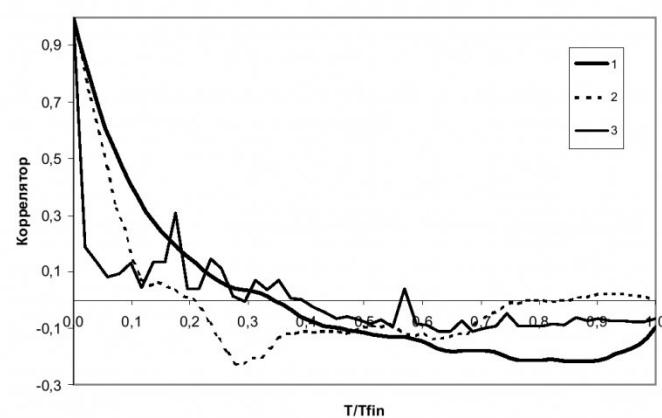


Рис.4. Поведения корреляционных функций: 1 – моделирование вероятностным клеточным автоматом (динамический внутренний сценарий), 2 – порфирит, 3 – кварцевый диорит (образец 1)

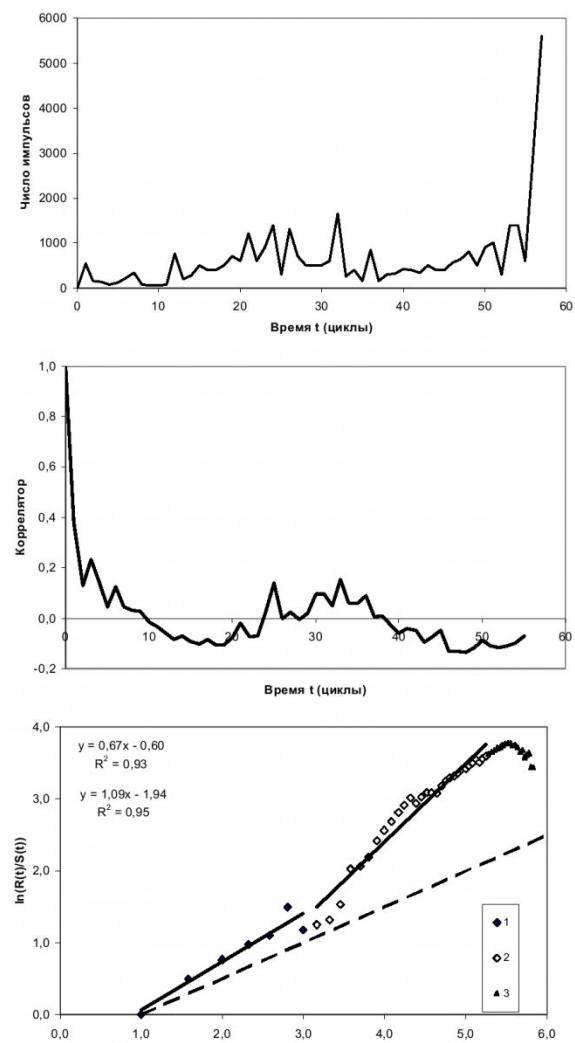


Рис.5. Характеристики импульсной электромагнитной эмиссии для кварцевого диорита (образец 2): число импульсов (вверху), корреляционная функция и нормированный размах Херста (внизу)

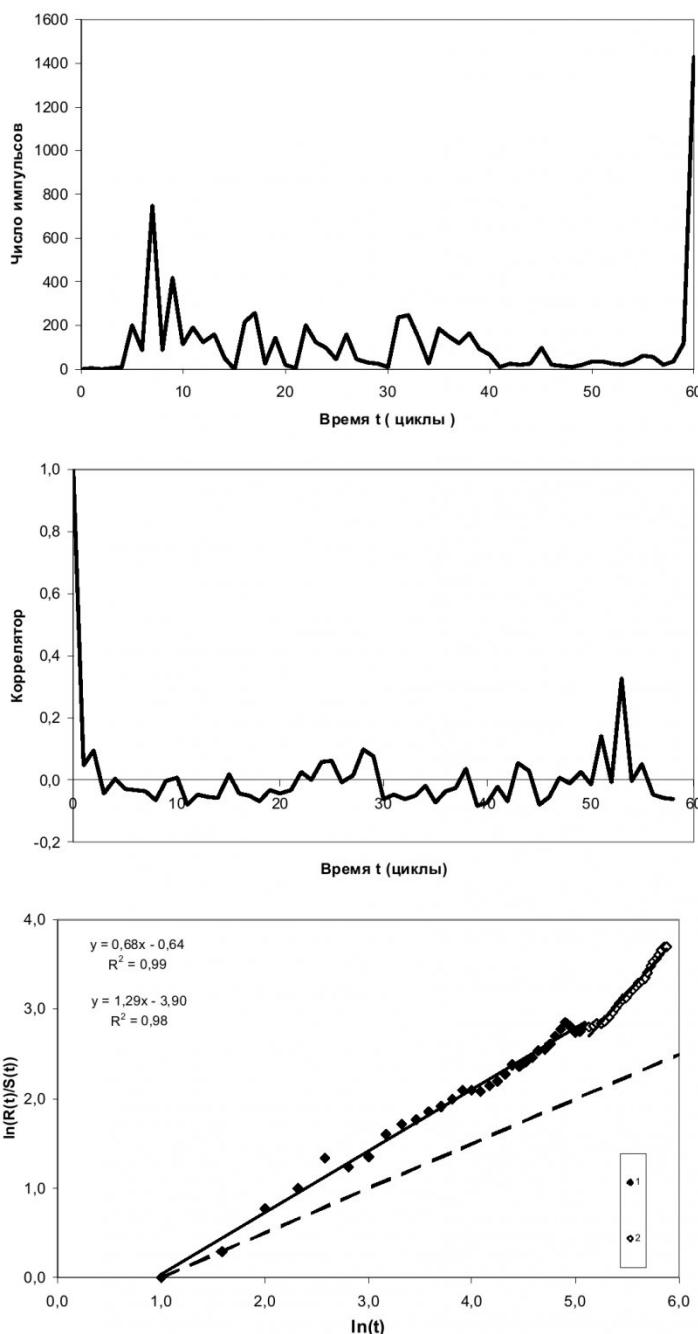


Рис.6. Характеристики импульсной электромагнитной эмиссии для кварцевого диорита (образец 3): число импульсов (вверху), корреляционная функция и нормированный размах Херста (внизу)

Как показано в [4, 5], переход системы на стадию, предшествующую разрушению, наиболее ярко проявляется в кинетических зависимостях числа кластеров элементарных повреждений и корреляционной функции временного ряда «число кластеров элементарных повреждений». В то же время в экспериментах по импульсной электромагнитной эмиссии на-

груженных материалов поток импульсов характеризует число вновь образующихся микротрещин и изменение размеров трещин, образовавшихся за предшествующее время. Поэтому в настоящей работе сопоставление корреляционных функций временного ряда «число элементарных повреждений» проводилось как по данным компьютерного моделирования,

так и по экспериментально измеренному потоку электромагнитных импульсов. Целью такого сопоставления было выявление таких особенностей поведения корреляционных функций, которые можно было бы сопоставить с особенностями кинетической кривой числа кластеров элементарных повреждений и корреляционной функцией числа кластеров на стадиях, предшествующих разрушению системы.

Получаемые в ходе эксперимента и моделирования временные автокорреляционные функции, характеризующие связь между значениями случайной величины во временном ряду, разделенными τ циклами, вычислялись по формуле [8]

$$K(\tau) = \frac{\sum_{i=0}^N (x(i + \tau) - \bar{x})(x(i) - \bar{x})}{\sum_{i=0}^N (x(i) - \bar{x})^2}$$

где $x(i)$ – значение рассматриваемой случайной величины в i -м цикле.

Характеристики случайного процесса импульсной электромагнитной эмиссии для исследованных горных пород представлены на рис. 1 – 3. При этом выявляются следующие закономерности.

Как видно из приведенных рисунков, особенности кинетической кривой для числа импульсов электромагнитной эмиссии (ЭМИ) соответствуют особенностям на их корреляционных функциях. Так для образца кварцевого диорита (рис.1), число импульсов ЭМИ монотонно нарастает с течением времени, значительно увеличиваясь перед разрушением образца на временах, составляющих примерно 70 – 80 % от времени до разрушения. При этом значения корреляционной функции переходят в отрицательную область на временном шаге, составляющем примерно 40% от времени до разрушения, и достигают минимального значения на временах, составляющих примерно 80% от времени

до разрушения. Для образцов порфирита (рис.2) и известняка (рис.3) вид кинетических кривых и корреляционных функций сигналов ЭМИ качественно согласуется с аналогичными характеристиками образца кварцевого диорита (рис.1). Таким образом, во всех рассмотренных случаях переход значений корреляционной функции в отрицательную область предшествует росту числа сигналов ЭМИ перед разрушением образца. Такое поведение кинетических кривых и корреляционных функций для числа сигналов ЭМИ качественно согласуется с характеристиками случайного процесса «число элементарных повреждений» для динамического внутреннего сценария при моделировании процесса накопления повреждений вероятностным клеточным автоматом [4, 5].

Это наиболее четко видно при сравнении корреляционных функций случайного процесса «число элементарных повреждений» для динамического внутреннего сценария моделирования с корреляционными функциями для сигналов ЭМИ кварцевого диорита и порфирия относительных координатах (рис. 4). Хорошее согласие между характеристиками случайного процесса накопления повреждений, полученными путем моделирования, с экспериментальными данными в рассмотренных выше случаях обусловлено, по-видимому, тем, что исследованные образцы пород были преимущественно однородными, также как и распределение разрушающей нагрузки, что продолжалось вплоть до формирования магистральной трещины. Именно такая картина наблюдается и при моделировании вероятностным клеточным автоматом при использовании внутреннего динамического сценария.

В то же время характеристики случайного процесса ЭМИ для образца кварцевого диорита, представленные на

рис.5, несколько отличаются от приведенных выше. Так на кинетической кривой наблюдается увеличение числа импульсов эмиссии на временах, составляющих примерно 50% от времени до разрушения. Соответственно первый переход значений корреляционной функции в отрицательную область предшествует этому процессу. Кроме того, наблюдается второй переход значений корреляционной функции в отрицательную область, предшествующий росту числа импульсов ЭМИ перед разрушением системы. Характеристики случайного процесса ЭМИ образца кварцевого диорита, представленные на рис.6 отличаются тем, что число сигналов ЭМИ резко возрастает сразу после нагружения образца. Соответственно значения корреляционной функции резко переходят в отрицательную область. Такое поведение характеристик случайного процесса ЭМИ обусловлено тем, что данные образцы были существенно неоднородными уже первоначально, из-за наличия крупных скоплений биографических дефектов. В результате в процессе разрушения образца, формировалось несколько магистральных трещин, объединение которых и привело к окончательному разрушению образца более чем на две части.

Следует особо отметить, что переход значений корреляционных функций в отрицательную область в каждом из рассматриваемых случаев предшествовал сильному росту числа импульсов ЭМИ. Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемая смена знака корреляционной функции может рассматриваться как предвестник интенсификации процесса образования элементарных повреждений. Для проверки этого факта были проанализированы зависимости статистики нормированного размаха Херста для всех исследованных образцов.

Метод нормированного размаха Херста (*R/S* анализ)

принято использовать как эффективный тест для проверки типа случайного процесса. Исходными данными для анализа этим методом являются временные зависимости текущего значения размаха случайного процесса, нормированного на текущее значение среднеквадратичного отклонения $R(t)/S(t) \propto |t|^H$, приводящие в дважды логарифмических координатах к линейной зависимости $\ln(R/S) \propto H \ln |t|$.

Коэффициент наклона этой зависимости - показатель Херста H , и определяет тип исследуемого случайного процесса. Так значения $H=1/2$ указывают на то, что исследуемый процесс является случайным процессом с независимыми приращениями, а значения $H>1/2$ указывают, что процесс является персистентным (поддерживающим наблюданную в прошлом тенденцию) [9, 10].

Поведение статистики нормированного размаха Херста для случайного процесса импульсной электромагнитной эмиссии при нагружении исследованных материалов приведены на рис.1 – 3, 5, 6, где экспериментальные результаты представлены различными маркерами, а пунктиром - опорная линия с наклоном $H=1/2$.

Как видно из рисунков, на временных зависимостях статистики нормированного размаха в дважды логарифмических координатах четко наблюдаются два прямолинейных участка, коэффициенты наклона которых различаются от полутора до трех раз в зависимости от конкретного образца. Значения показателя Херста на первом линейном участке лежат в интервале от $H=0.63\pm 0.03$ до $H=0.88\pm 0.02$, а второй линейный участок начинается на временах, составляющих примерно 70% от времени до разрушения системы. При этом надежность определения значений показателя Херста характеризуются значениями коэффициента детерминации $R^2 > 0.8$.

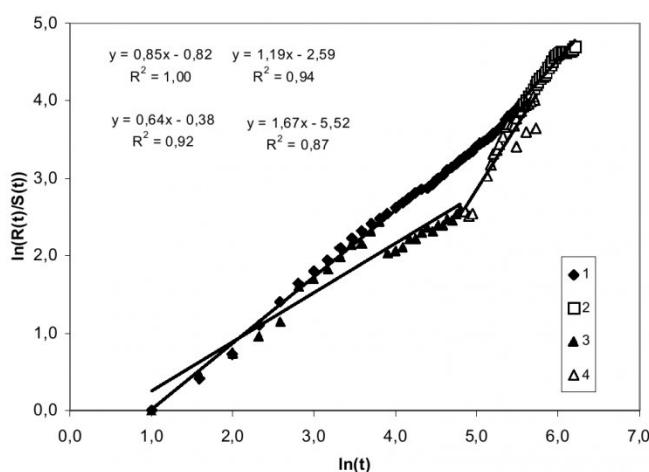


Рис.7. Сравнительное поведение нормированного размаха Херста: 1, 2 – моделирование вероятностным клеточным автоматом (динамический внутренний сценарий) первый и второй участки соответственно, 3, 4 – кварцевый диорит (образец 1) первый и второй участки соответственно

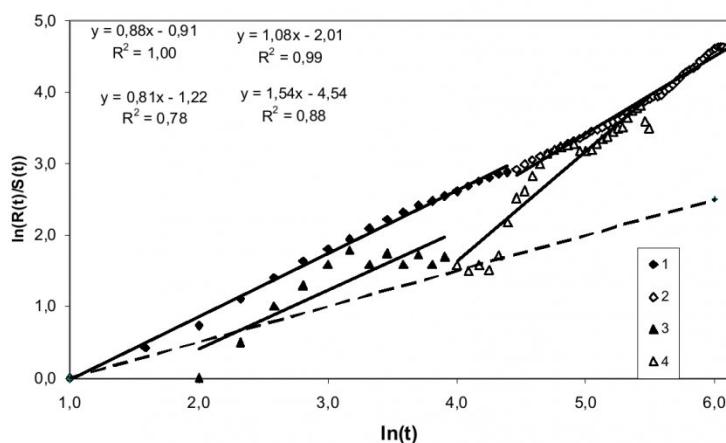


Рис.8. Сравнительное поведение нормированного размаха Херста: 1, 2 – моделирование вероятностным клеточным автоматом (динамический внутренний сценарий) первый и второй участки соответственно, 3, 4 – известняк, первый и второй участки соответственно

На рис. 7, 8 приведено сравнение наблюдаемых в эксперименте зависимостей статистики нормированного размаха с результатами моделирования вероятностным клеточным автоматом в случае динамического внутреннего сценария, который использовался при описании поведения корреляционных функций. На зависимости нормированного размаха числа импульсов ЭМИ для кварцевого диорита различие между первым и вторым линейными участками выражено более четко. Показатель Херста, соответст-

вующий первому участку, составляет $H=0.63\pm 0.02$, а показатель Херста для второго – $H=1.67\pm 0.04$ (рис.7). На зависимости нормированного размаха числа импульсов ЭМИ для известняка показатель Херста изменяется от значения $H=0.81\pm 0.03$ на первом участке до значения $H=1.54\pm 0.04$ на втором (рис.8). В то же время зависимости нормированного размаха, полученные в ходе моделирования, имеют более плавный характер и ее излом выражен менее четко: значение

показателя Херста достаточно сильно превышает значение $H=1/2$ уже на начальном участке и равно $H=0.85\pm 0.01$, увеличиваясь примерно в полтора раза до значений $H=1.19\pm 0.02$ на конечном участке. Таким образом, поведение показателя Херста для случайного процесса «число элементарных повреждений», полученное моделированием, качественно согласуется с поведением показателя Херста для потока импульсов ЭМИ, наблюдаемым экспериментально как в настоящей работе, так и в более ранних работах [1, 2]. Количественное же различие результатов моделирования от эксперимента, скорее всего, объясняется тем, что наблюдаемый поток ЭМИ получен от объемных образцов и обусловлен процессом накоплением микротрещин, проходящим по нескольким сценариям, тогда как результаты моделирования получаются при реализации одного сценария.

Следует особо отметить, что наблюдаемый экспериментально излом на зависимости статистики нормированного размаха в дважды логарифмических координатах согласуется с прохождением корреляционной функции временного ряда «число элементарных повреждений» через точку локального минимума. В то же время, согласно результатам моделирования [4, 5], прохождение корреляционной функции через точку локального минимума соответствует переходу эволюции кластеров элементарных повреждений на заключительную стадию коалесценции, которая интерпретируется как переход эволюции кластерной структуры элементарных повреждений на стадию, непосредственно предшествующую разрушению.

Таким образом, проведенное сравнительное исследование временных автокорреляционных функций и статистики нормированного размаха Херста для процессов импульсной электромагнитной эмиссии и

процесса накопления элементарных повреждений, полученного моделированием при помощи вероятностного клеточного автомата, позволяет сделать следующие выводы.

1. Наблюдаемый для потока импульсов ЭМИ переход корреляционной функции в область отрицательных значений может

интерпретироваться как предвестник интенсификации процесса образования микротрешин.

2. Наблюдаемый для потока импульсов ЭМИ излом на зависимости статистики нормированного размаха может интерпретироваться как переход системы на стадию непосредствен-

но предшествующую разрушению, длительность которой не превышает 40% от времени, предшествующего переходу.

Авторы благодарят профессора Д. В. Алексеева за обсуждение работы и ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Д.В., Егоров П.В. Персистентность накопления трещин при нагружении горных пород и концентрационный критерий разрушения // Докл. АН.– 1993. – т.333.– № 6.– с.
2. Алексеев Д.В., Егоров П.В., Иванов В.В. и др. Херстовская статистика временной зависимости электромагнитной эмиссии при нагружении горных пород // ФТПРПИ. – 1993.– № 5. – с.45 – 49.
3. Алексеев Д.В., Егоров П.В., Мальшин А.А. Статистические свойства электромагнитного излучения при разрушении горных пород // Вестн. КузГТУ. – 2005. – № 1. – с. 23 – 28.
4. Алексеев Д.В., Казунина Г.А. Моделирование кинетики накопления повреждений вероятностным клеточным автоматом // ФТТ.– 2006.– т. 48. – № 2.– с.255 – 261.
5. Алексеев Д.В., Казунина Г.А. Кинетика кластеров элементарных повреждений в нагруженных материалах: моделирование вероятностным клеточным автоматом // ФТПРПИ. – 2006.– № 1. – с.49 – 60.
6. Алексеев Д. В. Компьютерное моделирование физических задач в Microsoft Visual Basic. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2004.-514 С.
7. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А. О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочно- галоидных кристаллов и горных пород автоматом // ФТПРПИ. – 1988.– № 1. – с.67 – 70.
8. Берк К., Кэйри П. Анализ данных с помощью Microsoft Excel. – М.: Вильямс, 2005.– 300с.
9. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1990. – 260 с.
10. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 527 с.

□ Авторы статьи:

| | |
|--|--|
| Казунина Галина Алексеевна – канд. физ.-мат. наук , доц. каф. высшей математики | Мальшин Анатолий Александрович – канд. техн. наук , доц. каф. физики |
|--|--|

УДК 622.833.5

В.М. Волков, А.Е. Клыков

ВЛИЯНИЕ БОКОВОГО РАСПОРА МАССИВА НА СМЕЩЕНИЯ В ВЫРАБОТКЕ

При расчете смещений в выработке необходимо принимать во внимание начальное напряженное состояние массива в месте её расположения. Если нет результатов замеров напряжений в нетронутом массиве, то в случае одиночной выработки это напряженное состояние следует принимать гидростатическим, как наиболее вероятным, с составляющими $q = \gamma H$, равными давлению пород на глубине H расположения выработки. Однако такое состояние может измениться под влиянием опорного давления очистной выработки. При коэффициенте концентрации опорного давления $k_{od} = 1.2$ дополнительная вертикальная составляющая массива $\Delta q = 0.2q$. Прирост этой со-

ставляющей сопровождается приростом упругого бокового отпора, зависящего от коэффициента Пуассона μ пород. При $\mu = 0.25$ прирост горизонтальной составляющей равен $0.2q \cdot \mu / (1 - \mu) = 0.0667q$. В итоге вертикальная составляющая массива окажется равной $1.2q$, горизонтальная – $1.0667q$, а коэффициент бокового распора $n = 1.0667 / 1.4 = 0.89$.

Необходимо выяснить, насколько существенно влияние неравнокомпонентного поля напряжений на смещения в выработке.

На вертикальной оси выработки круглого сечения радиусом R в поле напряжений с верти-