

УДК 550.345 (575.2) (04)

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТИ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ГЕОМЕХАНИКИ***А.С. Закупин* – мл. науч. сотр.,*А.В. Аладьев* – инженер,*Л.М. Богомолов* – канд. физ.-мат. наук*В.Н. Сычев* – научн. сотр.,*О.С. Хлыбов* – магистр

Computer modeling of seismic energy accumulation and further release has been performed with the use of sand-pile type model which allows man-made factors to be taken into account. The repeatability plots of simulating events have been obtained, the correlation of modeling data with a theory has been demonstrated.

Компьютерное моделирование процесса трещинообразования в нагруженных образцах геоматериалов и сейсмического процесса в земной коре проводилось на основе модели sand-pile (накопления песка) в условиях естественного развития, а также при воздействии внешних физических полей, так называемых энерговоздействий (ЭВ) [1, 2]. Модель sand-pile является одним из вариантов реализации систем с самоорганизованной критичностью. Имеется несколько ее вариантов, различающихся между собой способами подтока и перераспределения энергии между элементами системы (двумерными ячейками). В работе используется модель решетки A_{JK} с одинаковым для всех ячеек коэффициентом диссипации и с одинаковой скоростью подтока энергии в ячейки. Отмечено, что зависимости подчиняются степенному закону. Внешнее локальное энерговоздействие влияет на угловой коэффициент, при этом относительная доля высокоэнергетических (крупномасштабных) событий снижается. Это может свидетельствовать о том, что даже в индетерминистском пределе, соответствующем модели sand-pile, ЭВ могут оказывать определенное

благоприятное влияние на ход диссипации энергии в деформационном процессе.

Описание модели. В работе была использована модель, описанная в [3, 4]. Рассматривалась решетка, состоящая из $j \times k$ ячеек. Каждой ячейке соответствует своя величина энергии. Подток энергии осуществляется с равной вероятностью во все ячейки с одинаковой скоростью, т.е. в единицу времени любая ячейка может получить энергию ΔE . Условно эта величина в модели отождествляется с одной песчинкой. Все ячейки имеют одинаковый энергетический уровень насыщения (четыре песчинки), после которого наступает распад ячейки. Распределение энергии осуществляется в равных долях (по одной песчинке) между четырьмя соседними клетками. В начальный момент времени состояние системы определяется функцией $E(t_0) = \{E_1(t_0), E_2(t_0), \dots, E_N(t_0)\}$, причем во всех клетках энергия меньше максимального значения, которому соответствуют четыре песчинки. В процессе моделирования случайным образом в ячейки осуществляется подток энергии, пока величина энергии в какой-либо из них не достигнет предельного

уровня. С этого момента начинается быстрый процесс, состоящий в следующем:

- подток энергии прекращается;
- ячейка “рвётся”, т.е. её энергия сбрасывается до нуля, распределяясь по соседям в равных долях. Если в каких-либо ячейках в результате этого произойдёт также насыщение, то процесс продолжается и эти ячейки также “рвутся”.

В нашем случае используется модель быстрого процесса с обратным сбросом, т. е. порванная ячейка получает энергию от своих соседей, порвавшихся, после неё в том же быстром процессе. После того, как во всех ячейках решетки энергия становится меньше критического значения (ни в одной ячейке нет четырех песчинок), быстрый процесс завершается и продолжается подток энергии.

Кревые условия. Поведение модели существенно зависит от типа её решетки. В случае решетки с границами (нами используемый тип) имеет место *краевой эффект*, состоящий в следующем. При разрыве граничных ячеек часть энергии, приходящая на долю отсутствующих соседей диссипирует. Такие ячейки, имея меньшее число соседей, с меньшей вероятностью получают дополнительную энергию при быстром перераспределении. Таким образом, расположение ячейки имеет непосредственное отношение к её энергии. Чтобы уйти от чрезмерной зависимости системы в целом от крайних условий, выбирались решетки с достаточно большим числом ячеек $j \times k$.

Модельные события. Подмножество ячеек, порвавшихся в одном и том же быстром процессе, образует кластер, если у каждой ячейки этого подмножества есть хотя бы один сосед из того же подмножества и нет соседей, порвавшихся в том же быстром процессе, но не входящих в указанное подмножество. Если у какой-либо порвавшейся ячейки нет соседей, порвавшихся в том же быстром процессе, то она представляет собой единичный кластер. Каждый кластер – модельное событие. Результатом моделирования является каталог модельных событий, в котором каждое событие описывается следующими параметрами: время возникновения кластера, энергия события (количество ячеек в кластере), протяженность

кластера по длине и ширине. В нашей модели рассматривается возможность влиять на ход процесса за счёт введения возможности предотвращать переход в подкритическое состояние большого подмножества ячеек (большой части площади решетки) за счет дополнительного энергосоздания (добрасывание песчинки в ячейку) в определенной подобласти решетки.

Результаты. Получены данные для модели решетки с размерностью 16×16 , проведены два модельных эксперимента в течение одинаковых временных промежутков в программе SandPile v.1, разработанной в лаборатории моделирования энергонасыщенных сред ИС ОИВТ РАН. Программа запускалась на персональном компьютере P4 1,8ГГц 512МБ ОЗУ. На рис. 1–2 показаны фрагменты работающей программы.

Первый эксперимент проводился в условиях естественного развития моделируемого процесса без внешнего вмешательства, второй подразумевал использование оператором права на изменение энергетического состояния системы путем дополнительного притока энергии в выбранную ячейку. Для “мониторинга” выбирали квадрат с девятью ячейками, причем возможность добросить песчинку для оператора ограничивали промежутком времени в десять секунд (одна десятая часть от времени естественного притока энергии). В результате экспериментов были получены каталоги модельных событий, по которым построены графики повторяемости (рис. 3). Одним из критериев адекватности модели и реальной сейсмичности является соответствие графика повторяемости для модельных событий закону Гутенберга-Рихтера для каталогов землетрясений [5]. Другими словами, график повторяемости $N(E) = -bE+a$ должен быть линейен в широком диапазоне магнитуд (в нашем случае магнитуде соответствует величина кластера), причем b ограничена значениями $0.65 \leq b \leq 1.4$ [6]. Для определения величины b график повторяемости аппроксимировался методом наименьших квадратов в диапазоне значений от 0 до ΔE .

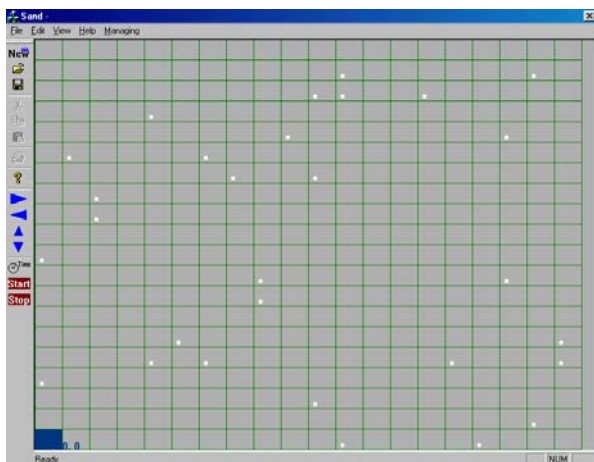


Рис. 1. Начальная фаза модельного эксперимента.

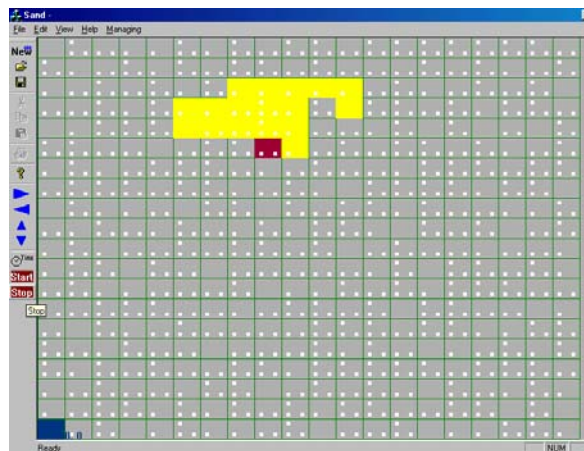


Рис. 2. Модельное событие с эпицентром в квадрате.

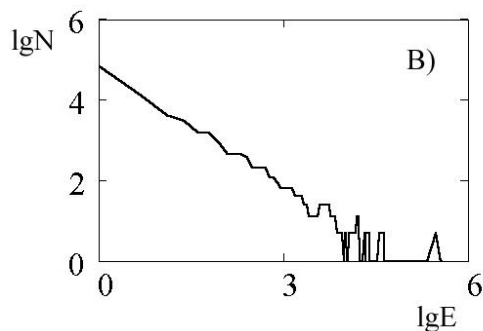
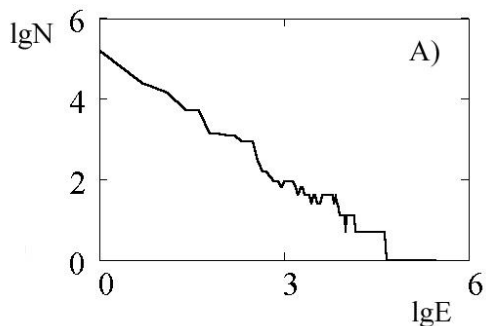


Рис. 3. График повторяемости событий: А – для модельного расчёта с параметрами: $j = 16, k = 16, t = 200ms$; В – энерговодействие в квадрате с координатами диагонали [7,7; 9,9]. Аналогичный модельный расчёт без энерговодействия.

Величину ΔE выбирали таким образом, чтобы исключить характерный завал графика повторяемости в области больших магнитуд. Соответственно для первого и второго экспериментов расчетная величина b составила 0,948 и 1,036. Очевидно, что графики повторяемости согласуются с теорией и описывают моделируемый процесс с высокой точностью. На рис. 3 видно, что модель с внешним источником воздействия “выгодно” отличается от модели естественного сейсмического процесса, исчезают выбросы событий большой магнитуды, а энергетический баланс сохраняется за счет увеличения количества малых событий. Тенденция налицо и очевидно, что эффект бу-

дет ещё более ощутимым на решетки большего размера.

Применение подобной модели является существенным шагом в развитии представлений о самоорганизации в сложных нелинейных системах и переходом от синергетики Пригожина к теории самоорганизованной критичности (СОК) третьего тысячелетия.

Результаты компьютерного моделирования показали, что выбранная нами модель отражает многие существенные закономерности реального сейсмического процесса. Применительно к вопросу об энерговодействии на геологическую среду для снижения избыточных напряжений [1, 2] полученные результаты, основанные на модели sand-pile, описыва-

ют предельный случай индетерминистского поведения СОК-системы (очаговой области) вблизи критической точки. Этот случай – самый неблагоприятный с точки зрения оптимизации энерговоздействий, исключающий использование априорной информации о состоянии системы. Поэтому важен результат моделирования, свидетельствующий о том, что и для такого предельного случая может быть достигнут “полезный” эффект сокращения доли крупноэнергетических событий за счет возрастания числа событий со слабой энергетикой. При этом проявилось то обстоятельство, что удается оказывать влияние на подкритические процессы лишь при наличии достаточно быстрой управляющей системы.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря гранту № YG1-2316-B1-02 Американского фонда гражданских исследований и развития для независимых государств бывшего Советского Союза (АФГИР) и гранту №03-05-65077 Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

Литература

1. *Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Пономарев А.В., Соболев Г.А.* Некоторые вопросы изменения состояния геологической среды при электромагнитном воздействии импульсами МГД-генератора // Научн. тр. ИТЭС ОИВТ РАН / Под ред. В.Е. Фортова и А.П. Лихачева. – Вып. 3, 2000. – С. 217–224.
2. *Закупин А.С., Аладьев А.В., Богомолов Л.М., Боровский Б.В. и др.* Влияние внешнего электромагнитного поля на активность акустической эмиссии нагруженных геоматериалов / Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Ред. С.В. Гольдин и Ю.Г. Леонов. – М., 2003. – С. 304–318.
3. *Шаповал А.Б., Шнирман М.Г.* Сценарий сильных событий в модели накопления песка // Проблемы теоретической сейсмологии и сейсмичности. Вычислительная сейсмология / Под ред. В.И. Кейлис-Борока. – М.: Геос, 2002. – С. 267–277.
4. *Ротвайн И.М., Колесникова Н.М., Ломовский И.В., Кузнецов И.В.* Поведение одного типа модели sand-pile: периодичность и ее влияние на график повторяемости // Там же. – С. 220–244.
5. *Gutenberg B., Richter C.* Seismicity of the earth and associated phenomena. – Princeton, New-Jersey: Princeton University Press. – 1954. – 310 p.
6. *Кронрод Т.Л.* Параметры сейсмичности для основных высокосейсмичных районов мира // Логические и вычислительные методы в сейсмологии. – М.: Наука, 1984. – С. 36–58. (Вычисл. сейсмология, Вып.17).