

УДК 622.83+ 530.1(075.8)

## ИЗУЧЕНИЕ И КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ МАССИВОВ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ОТКРЫТЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.А. Хачай

Произведено сопоставление теоретических результатов причин хаотизации нелинейных диссипативных динамических систем и результатов обработки методом фазовых диаграмм данных детального шахтного сейсмического каталога удароопасного массива горных пород. Анализ фазовых диаграмм натуральных шахтных наблюдений совпал с теоретическим прогнозом хаотизации открытых динамических систем.

*Ключевые слова:* хаотизация; нелинейная диссипативная система; удароопасный массив; сейсмический каталог.

## STUDY AND CONTROL OF ROCK MASSIFS FROM THE PERSPECTIVE OF OPEN DYNAMIC SYSTEMS THEORY

О.А. Hachay

It is provided the comparison between the theoretical results of chaotization causes of nonlinear dissipative dynamical systems and the processing results of detailed seismic catalogue data of a rock shock massif, using the method of phase diagrams. The developed results showed their identity with the theoretical forecasting of open dynamical systems chaotization.

*Key words:* chaotization; nonlinear dissipative system; rock shock massif; seismic catalogue.

Известно, что подавляющее число геологических систем, в том числе и горные массивы, находящиеся под влиянием взрывных воздействий, являются открытыми и неравновесными динамическими системами. Прекращение энергетического потока обрекает их на переход в стадию консервации, когда длительность существования обуславливается ее энергетическим потенциалом за счет накопленной энергии на предыдущем этапе [1]. На определенной стадии развития открытая динамическая система, обменивающаяся веществом и энергией с окружающей средой, распадается на ряд подсистем, которые в свою очередь могут и далее дробиться на еще меньшие системы. Критерием определения границ таких систем является одно из положений синергетики: макроскопические процессы в системах, где в нелинейной области протекают процессы самоорганизации, совершаются кооперативно, согласованно и когерентно. В основе процессов самоорганизации в открытых неравновесных геологических системах лежит энергетическое начало. Если энергетический потенциал не достигает порогового значения, то процессов самоорганизации не происходит, если же его достаточно, чтобы компенсировать его потери во внешнюю среду, то

в ней будут проявляться процессы самоорганизации и образовываться пространственно-временные или временные структуры. Переход хаос–структура осуществляется скачком. Если поступление энергии в систему слишком много, структурирование среды прекращается, и мы имеем переход к хаосу.

В любых открытых, диссипативных и нелинейных системах возникают автоколебательные процессы, поддерживаемые внешними источниками энергии, в результате которых протекает самоорганизация [2].

Парадигма физической мезомеханики, введенной академиком В.Е. Паниным и его школой [3], включающая в себя синергетический подход, является конструктивным средством для изучения и изменения состояния гетерогенных материалов. Этот результат получен учениками этой школы на образцах различных материалов. В наших исследованиях нестационарной геологической среды в рамках натуральных экспериментов в реальных горных массивах, находящихся под сильным техногенным влиянием, было показано, что динамика состояния может быть выявлена с использованием синергетики в иерархических средах [4, 5]. Важную роль при исследовании динамических геологических

систем играет сочетание активного и пассивного геофизического мониторинга, который можно осуществить с использованием электромагнитных и сейсмических полей. Изменение состояния системы на исследуемых пространственных базах и временах проявляется в параметрах, связанных со структурными особенностями среды второго и более высокого ранга. Таким образом, изучение динамики состояния, его структуры и явления самоорганизации массива следует вести геофизическими методами, настроенными на многогранговую иерархическую нестационарную модель среды.

С математической точки зрения под динамической системой понимается объект или процесс, для которого определено понятие состояния как совокупности значений некоторых величин в заданный момент времени, и задан оператор, определяющий эволюцию начального состояния во времени [6]. Если для описания поведения системы достаточно знать ее состояние в конечном числе моментов времени, то такая система называется системой с дискретным временем. Пусть набор чисел  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  в некоторый момент времени описывает состояние динамической системы и разным наборам  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  соответствуют разные состояния. Зададим эволюционный оператор, указав скорость изменения каждого состояния системы

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(t, x_1, x_2, \dots, x_N), i = 1, \dots, N, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x}$  – точка евклидова пространства  $R_N$ , которое называется фазовым пространством;  $\mathbf{x}$  – фазовая точка. Система вида (1), в которой правая часть не зависит от времени, называется автономной. При изучении динамической системы, связанной с изменением состояния нефтяного пласта вследствие вибровоздействия, правые части уравнений (1) будут зависеть от времени, и система (1) не будет автономной. Если систему уравнений дополнить начальными условиями  $x(0) = x_0$ , то получится начальная задача (задача Коши) для системы уравнений (1). Ее решение  $\{x(t), t > 0\}$ , рассматриваемое как множество точек фазового пространства  $R_N$ , образует фазовую траекторию; вектор-функция  $F(\mathbf{x})$  задает векторное поле скоростей. Фазовые траектории и векторное поле скоростей дают наглядное представление о характере поведения системы с течением времени. Множество фазовых траекторий, соответствующих различным начальным условиям, образуют фазовый портрет динамической системы.

Динамические системы подразделяются на консервативные и диссипативные системы. Для первых полная энергия системы сохраняется, для вторых возможны потери энергии. К нашей задаче изучения состояния массива, находящегося в процессе отра-

ботки, ближе всего подходит модель неоднородной и нестационарной диссипативной системы. Тем не менее, в массиве могут оказаться такие его локальные участки, которые будут описываться и консервативной динамической моделью, т. е. моделью энергетического равновесия. Анализ фазового портрета динамической системы позволяет сделать вывод о состоянии системы за период ее наблюдения. Так, в консервативных системах не существует притягивающих множеств. Притягивающим называется такое подмножество фазового пространства  $R_N$ , к которому с течением времени стремятся траектории, начинающиеся в некоторой его окрестности. Если в консервативной системе существует периодическое движение, то таких движений бесконечно много и определяются они начальным значением энергии. В диссипативных системах могут существовать притягивающие множества. Стационарные колебания для диссипативных динамических систем не характерны. Однако в нелинейных системах возможно существование периодического асимптотически устойчивого движения, математическим образом которого является предельный цикл, изображаемый в фазовом пространстве замкнутой линией, к которой со временем стягиваются траектории из некоторой окрестности этой линии. По форме фазового портрета можно судить о характерном поведении системы, причем “плавные” деформации фазового пространства не приводят к качественным изменениям динамики системы. Это свойство называется топологической эквивалентностью фазовых портретов. Оно позволяет анализировать поведение различных динамических систем с единой точки зрения: на его основе множество рассматриваемых динамических систем можно разбить на классы, внутри которых системы демонстрируют качественно схожее поведение. С математической точки зрения “плавная деформация” фазового портрета есть взаимно однозначное и взаимно непрерывное преобразование фазовых координат, в результате которого не может появиться новых особых точек, а с другой стороны – особые точки не могут исчезнуть.

В работе [7] тезис о том, что массив горных пород является открытой динамической системой, состояние которой определяется синергетическими свойствами, продемонстрирован количественно путем анализа фазовых портретов. В качестве фазовых координат использованы параметры интегральной и поинтервальной интенсивности зон неоднородности второго ранга и их разностных аналогов производных по времени, определяемых по данным активного электромагнитного индукционного пространственно-временного дискретного мониторинга. Дальнейшие исследования состояния массива

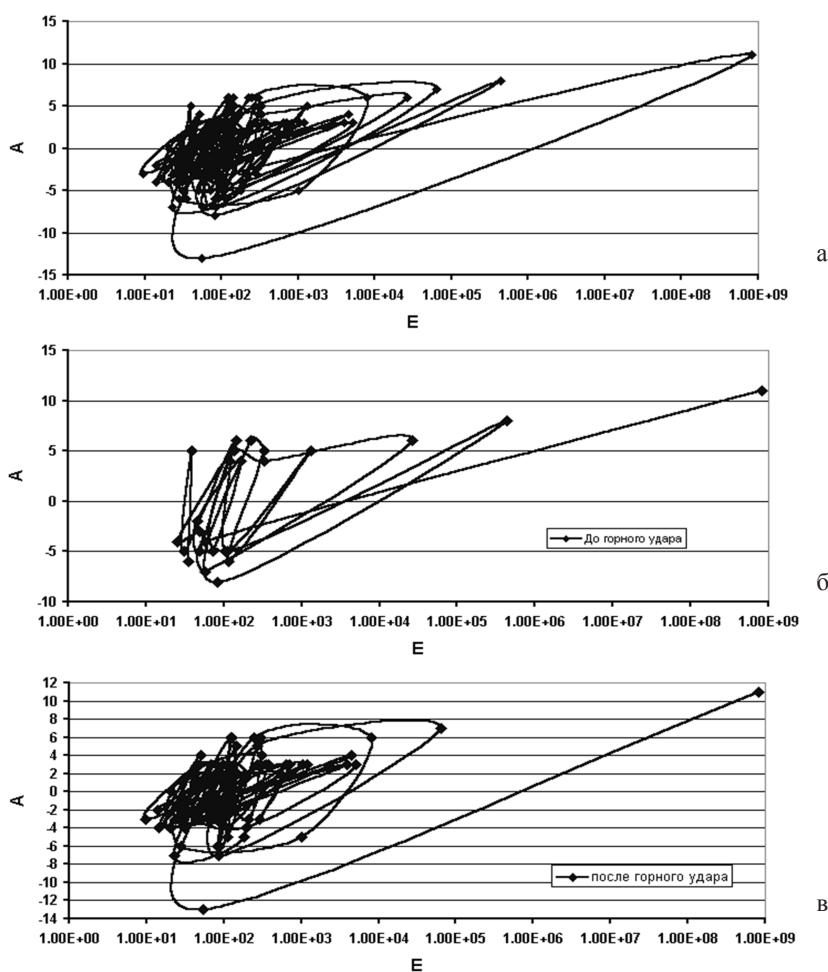


Рисунок 1 – Фазовый портрет отклика состояния массива во время одного из наиболее сильных горных ударов на Таштагольском руднике: а – за промежуток времени 25.11–29.12 2007 г.; б – за промежуток времени до горного удара; в – за промежуток времени после горного удара; ось OX – выделенная массивом энергия в Дж за соответствующие промежутки времени; ось OY- $d(\lg E)/dt$ ;  $t$  – время в долях суток

с использованием подходов теории динамических систем [2, 7] продолжены с целью выяснения критериев смены режимов диссипативности для реальных горных массивов, находящихся под сильным техногенным воздействием. Для реализации этого исследования были использованы данные сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника за два года – с июня 2006 г. по июнь 2008 г. В качестве данных использованы пространственно-временные координаты всех динамических явлений-откликов массива, произошедших за этот период внутри шахтного поля, а также взрывов, произведенных для отработки массива, и значения зафиксированной сейсмической станцией энергии [8]. Фазовые портреты состояния массивов северного и южного участков построены в координатах  $Ev(t)$  и  $d(Ev(t))/dt$ ,  $t$  – вре-

мя, выраженное в долях суток,  $Ev$  – выделенная массивом сейсмическая энергия в Дж. В этой работе проанализирована морфология фазовых траекторий сейсмического отклика на взрывные воздействия в различные последовательные промежутки времени южного участка шахты. В этот период по данным о произведенных технологических и массовых взрывов, большая часть энергии была закачана именно в южный участок шахты. Кроме того, в конце 2007 г. именно в южном участке произошел один из самых сильных горных ударов за всю историю работы рудника. В результате анализа выделена характерная морфология фазовых траекторий отклика массива, находящегося локально во времени в устойчивом состоянии – на фазовой плоскости имеется локальная область в виде клубка переплетенных траекторий

и небольшие выбросы от этого клубка, не превышающие по энергии значений  $10^5$  Дж. В некоторые промежутки времени этот выброс превышал  $10^5$  Дж, достигая  $10^6$  Дж и даже  $10^9$  Дж (рисунок 1).

Поскольку исследуемый объем массива один и тот же, и мы изучаем процесс его активизации и спада, то очевидно, что имеют место два взаимозависящих друг от друга процесса – накопление энергии в притягивающей фазовые траектории области и резонансного сброса накопленной энергии. Интересно отметить, что после этого сброса система возвращается снова в эту же притягивающую фазовые траектории область.

Это подтверждается и детальным анализом фазовых траекторий сейсмического отклика массива до и после самого сильного горного удара (рисунок 1, а–в). Сопоставление фазовых портретов отклика состояния массива до и после горных ударов различной интенсивности и в различные промежутки времени свидетельствует о том, что выбранный нами объем в виде южного участка реагирует на оказываемое на него воздействие подобным образом, отражая слаженный или совместный механизм освобождения накопленной энергии.

В работе [2] и представленной там обширной библиографии приводится математический аппарат для моделирования процессов в локально активных сплошных средах. При этом подчеркивается, что в нелинейных активных средах возникновение возмущений может носить локализованный и даже спонтанный характер. Рассматриваемые процессы наблюдаются достаточно широко в физике, биологии, химии. Аналогичные процессы могут происходить и в среде, активное и возбужденное состояние которой поддерживается постоянной накачкой энергии из внешнего источника.

Общей причиной хаотизации и стохастизации движений динамической системы являются потери ими устойчивости и экспоненциальное разбегание близких фазовых траекторий, сочетающиеся с их общей ограниченностью и некоторым их общим сжатием. Простейшей моделью экспоненциальной неустойчивости в сочетании с общим сжатием может служить экспоненциальное нарастание отклонения с последующим сбросом. В фазовом пространстве область  $G$  соответствует области, в которой фазовые траектории экспоненциально разбегаются (в нашей терминологии область клубка фазовых траекторий на рисунке 1, а) и затем покидают ее. После того, как фазовые траектории покидают область  $G$ , характер движения изменяется, и дальнейшее движение фазовых точек приводит к их возврату в исходную область  $G$ . Этот результат совпадает с полученным анализом фазовых

диаграмм, построенных по данным сейсмического шахтного каталога (рисунок 1, а–в).

В работе [2] исследованы методы трансформации фазового пространства, отображающего реальные движения физической системы в пространстве и во времени. Для этого необходимо базу исходных данных, описывающих состояние нелинейной, нестационарной системы дополнить данными детального деформационного и электромагнитного пространственно-временного мониторинга. В этом случае можно удовлетворительно ставить задачу о прогнозе критического состояния локального участка горного массива, связанного с покиданием фазовой траектории области квазиустойчивого состояния.

Работа выполнена по гранту РФФИ 10-05-00013а и Интеграционному проекту с ИГД СО РАН 2009–2011.

#### Литература

1. *Летников Ф.А.* Некоторые проблемы синергетики в науках о Земле. Синергетика геосистем / Ф.А. Летников. М.: МО РМО, 2007. С. 72.
2. *Наймарк Ю.И.* Стохастические и хаотические колебания / Ю.И. Наймарк, П.С. Ланда. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. С. 424.
3. *Панин В.Е.* Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.Е. Панин. Новосибирск: Наука, 2005. Т. 1. С. 365.
4. *Хачай О.А.* Метод оценки и классификации устойчивости массива горных пород с позиции теории открытых динамических систем по данным геофизического мониторинга / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 6. С. 131–142.
5. *Хачай О.А.* Геофизический мониторинг состояния массива горных пород с использованием парадигмы физической мезомеханики / О.А. Хачай // Физика Земли. 2007. № 4. С. 58–64.
6. *Чуличков А.И.* Математические модели нелинейной динамики / А.И. Чуличков. М.: Физматлит, 2003. С. 294.
7. *Хачай О.А.* Теоретические подходы к обоснованию систем геофизического контроля состояния геологической среды при техногенном воздействии / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 1. С. 161–169.
8. *Хачай О.А.* Отражение синергетических свойств состояния массива горных пород под техногенным воздействием в данных шахтного сейсмологического каталога / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Климов, О.В. Шипеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 6. С. 259–271.