

УДК 622.83+ 530.1(075.8)

**О.А. Хачай**

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

Произведено сопоставление теоретических результатов причин хаотизации нелинейных диссилиативных динамических систем и результатов обработки методом фазовых диаграмм данных детального шахтного сейсмического каталога-сейсмических откликов на взрывные воздействия удароопасного массива горных пород. Из теории следует, что 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. Этот результат совпадает с полученным анализом фазовых диаграмм, построенных по данным сейсмического шахтного каталога. Для использования методов трансформации фазового пространства, отображающего реальные движения физической системы в пространстве и во времени необходимо дополнить базу исходных данных, описывающих состояние нелинейной, нестационарной системы 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 квазистабильного состояния.

**Ключевые слова:** шахтный сейсмический каталог, открытые динамические системы, фазовые траектории, горный массив.

---

**И**звестно, 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 сис-

тема, 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

---

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

системах лежит энергетическое начало. Если энергетический потенциал не достигнет 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, поддерживаемыми внешними источниками энергии, в результате которых протекает самоорганизация [2].

Парадигма физической мезомеханики, введенной академиком Паниным В.Е. и его школой [3], включающая в себя синергетический подход, является конструктивным средством для изучения и изменения состояния гетерогенных материалов. Этот результат получен этой школой на образцах различных материалов. В наших исследованиях нестационарной геологической среды в рамках натурных 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 для исследования динамических геологических систем играет сочетание активного и пассивного геофизического мониторинга, который можно осуществить с использованием электромагнитных и сейсмических полей. Изменение со-

стояния 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 многоранговую 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  $x = \{x_1, x_2, x_N\}$  в некоторый момент времени описывает состояние динамической системы и разным наборам  $\{x_1, x_2, x_N\}$  соответствуют разные состояния. Зададим эволюционный оператор, указав скорость изменения каждого состояния системы

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

$x$  — точка евклидова пространства  $\mathcal{R}_N$ , которое называется фазовым пространством,  $x$  — 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  $\mathcal{R}_N$ , образует фазовую траекторию; вектор-функция  $F(x)$  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. В приложение к нашей задаче изучения состояния массива, находящегося в процессе отработки, 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  $\mathcal{R}_N$ , 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

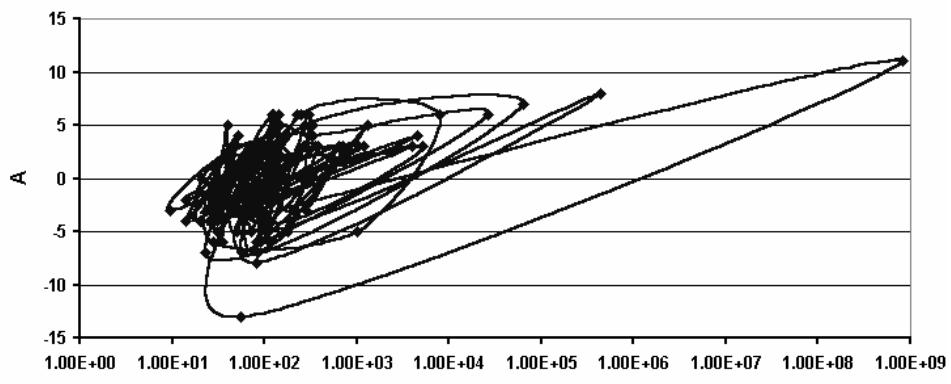


Рис. 1, а

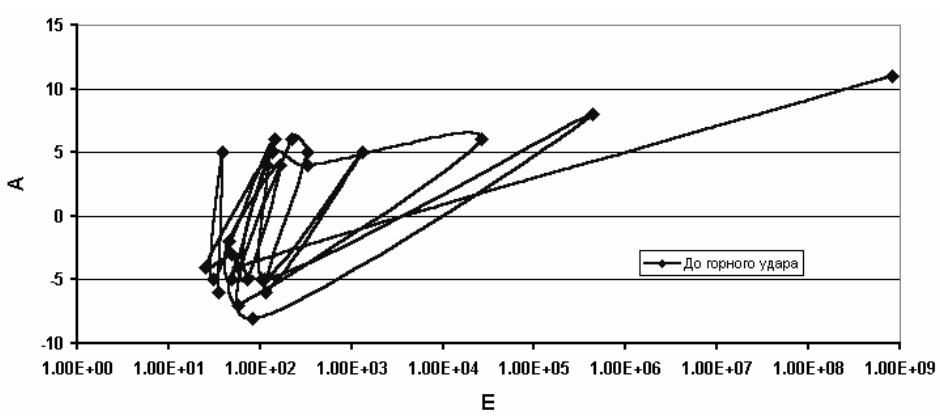


Рис. 1, б

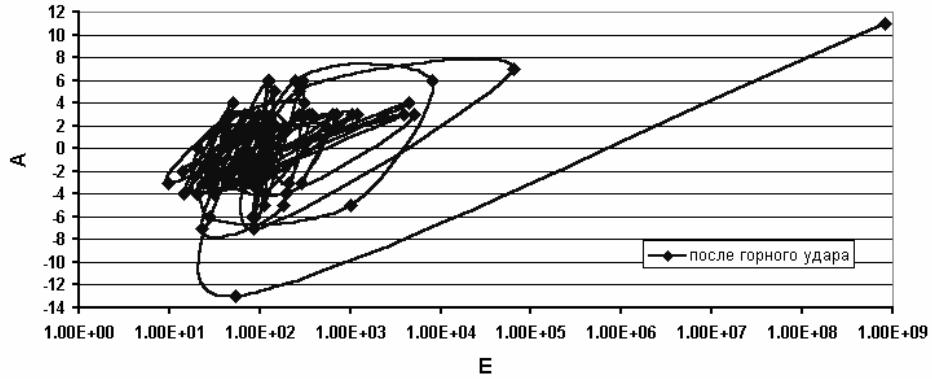


Рис. 1, в

**Рис. 1. Фазовый портрет отклика состояния массива во время одного из наиболее сильных горных ударов на Таштагольском руднике:** а) за промежуток времени 25.11-29.12.2007г.; б) за промежуток времени до горного удара; в) за промежуток времени после горного удара

Ось ОХ — выделенная массивом энергия в Дж за соответствующие промежутки времени, ось ОY —  $d(\lg E)/dt$ ,  $t$  — время в долях суток.

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 с использованием подходов теории динамических систем [2, 6] 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 года по июнь 2008 г. В качестве данных использованы пространственно-временные координаты всех динамических явлений-откликов массива, прошедших 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  $d(Ev(t))/dt$ ,  $t$  — время, 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 дан-

ным о произведенным технологическим и массовым взрывам большая часть энергии была закачана именно в южный участок шахты. Кроме того в конце 2007 года 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 превышает  $10^5$  Дж., достигая  $10^6$  Дж и даже  $10^9$  Дж.

Так как исследуемый объем массива один и тот же и мы изучаем процесс его активизации и спада, то очевидно 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 (рис. 1, а-в). Сопоставление фазовых портретов отклика состояния массива до и после горных ударов различной интенсивности и в различные промежутки времени свидетельствуют о том, что выбранный нами объем в виде южного участка реагирует на оказываемое на него воздействие по-

добным 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 возбудимое состояние которой поддерживается постоянной накачкой энергии из внешнего источника энергии.

Общей причиной хаотизации и стохастизации движений динамической системы являются потеря 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

бросом. В фазовом пространстве область  $G$  соответствует области, в которой фазовые траектории экспоненциально разбегаются (в нашей терминологии область клубка фазовых траекторий рис. 1а) 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 (рис. 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 квазистабильного состояния.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летников Ф.А. Некоторые проблемы синергетики в науках о Земле. Синергетика геосистем. — Москва: МО РМО, 2007. С. 7—15.
2. Наймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. // М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. — С. 424.
3. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. — Новосибирск: Наука, 2005. — Т. 1. — С. 365.
4. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Метод оценки и классификации устойчивости массива горных пород с позиций теории открытых динамических систем по данным геофизического мониторинга. // Горный информа-

- ционно-аналитический бюллетень. МГГУ, 2005. — № 6. — С. 131—142.
5. Хачай О.А. Геофизический мониторинг состояния массива горных пород с использованием парадигмы физической мезомеханики. // Физика Земли, 2007. — № 4. — С. 58—64.
6. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. М.: Физматлит, 2003. — С. 294.
7. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Теоретические подходы к обоснованию систем геофизического контроля состояния геологи- ческой среды при техногенном воздействи-и. // Горный информационно-анали-тический бюллетень МГГУ. 2008. № 1. С. 161—169.
8. Хачай О.А., Хачай О.Ю., Климко В.К., Шипеев О.В. Отражение синергетиче-ских свойств состояния массива горных пород под техногенным воздействи-ем в данных шахтного сейсмологического ката-лога.// Горный информационно-анали-тический бюллетень МГГУ, № 6, 2010, с. 259—271. ГИАБ

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Хачай Ольга Александровна — доктор физико-математических наук, ведущий научный со-трудник, Институт геофизики УрО РАН. [Olga.hachay@r66.ru](mailto:Olga.hachay@r66.ru).



---

## О Т Д Е Л Н Ы Е С Т А Т Ъ И ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (ПРЕПРИНТ)

### ПОЛУЧЕНИЕ КАМЕННОУГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

Сухомлинов Д.В. — аспирант, [Dmitry.Sukhomlinov@gmail.com](mailto:Dmitry.Sukhomlinov@gmail.com),

Кусков В.Б. — кандидат технических наук, доцент, [opikvb@mail.ru](mailto:opikvb@mail.ru),

Кускова Я.В. — кандидат технических наук, ассистент, [ledizet@rambler.ru](mailto:ledizet@rambler.ru),

Национальный минерально-сырьевая университет «Горный».

Утилизация маловостребованных в настоящее время углеродных материалов таких как угольные шламы и отсевы является весьма актуальной задачей. Метод брикетирования с применением связующих веществ позволяет повысить полноту использования энергетиче-ских ресурсов, вовлекая в переработку отсевы и шламы каменного угля с производством легковоспламеняющихся топливных брикетов для бытовых нужд населения. Также при этом решается целый ряд экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды тонкими классами угля.

**Ключевые слова:** брикетирование, связующее, прочность брикета, угольный шлам, топ-ливный брикет, отсев угля.

### MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF FUEL BRIQUETS WITH LOW IGNITION TEMPERATURE FROM COAL I

Sukhomlinov D.V., Kuskov V.B., Kuskova Y.V.

Two technologies are proposed for recycling of black coal siftings and slimes from the Pechora coal basin. Moreover, for briquetting of fine slurries the foreground technology is based on extrusion. The technology, based on the use of stamp press, utilizes coal siftings as a raw material.

**Key words:** briquetting, binder, briquette strength, coal slime, fuel briquette coal riddling, extru-sion, pressing.