© О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, 2008

УДК 622:550.3

О.А. Хачай, О.Ю. Хачай

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОБОСНОВАНИЮ СИСТЕМ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Семинар № 3

Принципы парадигмы физической мезомеханики, введенной академиком Паниным В.Е. и его школой [1], являются конструктивным средством для изучения состояния нестационарной геологической среды [2]. Натурные эксперименты в реальных горных массивах, находящихся под сильным техногенным влиянием, позволяют выявить особенности поведения геологической среды, фиксируемые в используемых геофизических полях [3–4]. Важную роль для исследования таких динамических систем играет активный геофизический мониторинг, который можно осуществить с использованием электромагнитных или сейсмических полей [5–7]. Как показал опыт наших исследований, изменение состояния системы на исследуемых пространственных базах и временах проявляется в параметрах, связанных со структурными особенностями среды второго ранга. Таким образом, изучение динамики состояния, его структуры и явлений самоорганизации массива можно вести геофизическими методами, настроенными на многоранговую иерархическую модель среды. Использование попланшетной многоуровневой индукционной электромагнитной методики с контролируемым источником и соответствующей методики обработки и интерпретации позволило выявить зоны дезинтеграции, являющиеся индикатором устойчивости массива [8]. Введение интегрального параметра – поинтервального распределения интенсивности зон дезинтеграции, позволяет перейти к детальной классификации массива по степени устойчивости, ввести для этого количественные критерии и характеризовать устойчивость массива с точки зрения выхода на стационарную цикличность положения максимума параметра $Sp\,int$ в зависимости от расстояния от контура выработки Zmax. Анализ дисперсии от частоты Zmax позволяет ввести дополнительные градации по устойчивости массива в детальную его классификацию. Сопоставление с данными сейсмологического мониторинга позволило осуществить геодинамическую классификацию массива с использованием интегрального параметра Sp [2, 9].

Цель настоящей работы показать имеющуюся взаимосвязь полученных нами ранее результатов с разработанной физико-математической теорией изучения состояния открытых динамических консервативных и диссипативных систем, к которым относятся массивы горных пород, находящихся в процессе отработки. Это позволит более обоснованно подходить к проблеме мониторинга состояния нестационарной среды.

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 [10]. В дальнейшем мы будем пользоваться сведениями теории динамических систем из монографии [10]. Если для описания поведения системы достаточно знать ее состояние в конечном числе моментов времени, то такая система называется системой с дискретным временем. Как правило, контроль состояния массива горных пород в шахтах ведется не непрерывно, а в рамках циклов наблюдений, либо в дискретные моменты времени. Для описания ее развития используются разностные аналоги дифференциальных эволюционных уравнений.

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

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

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 динамическими проявлениями в шахтах, уравнения (1) будут содержать правую часть, зависящую от времени, а наша система не будет описываться моделью автономной динамической системы. Если систему уравнений до-полнить начальными условиями x(0) = =x0, получим начальную задачу (задачу Коши) для 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 приложении к нашей задаче при изучении состояния массива, находящемся 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 характеристике 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 значением энергии при начальных условиях. В диссипативных системах могут существовать притягивающие множества. Стационарные незатухаю-

щие 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.

“Плавные” деформации фазового портрета можно осуществлять не только заменой фазовых переменных, но и с использованием внешнего управляющего параметра. В нашем случае этот эффект проявляется в виде частотной дисперсии фазового портрета, который будет проанализирован ниже.

Полученные ранее результаты изучения фазового состояния массива горных пород [2–9] свидетельствуют о том, что классифицирование массива по его устойчивости и дальнейший ее контроль можно весьма эффективно вести с использованием параметра Spint поинтервальной интенсивности неоднородностей второго ранга или, по принятой в геомеханике терминологии, зон дезинтеграции. Кроме того, при использовании параметра интегральной интенсивности Sp происходит хорошая сходимость с данными сейсмологического мониторинга той же области исследования, что и активного электромагнитного мониторинга. Поэтому для построения фазового портрета состояния массива на различных горизонтах и в выработках, расположенных на различных удалениях от очистного пространства, мы используем в качестве фазовых координат параметры Spint и d/dt(Spint), а также Sp и d/dt(Sp), определенные по семи циклам активного электромагнитного индукционного мониторинга.

Под символами d/dt(Spint) и d/dt(Sp) будем понимать разность последовательных (по времени) значений, промежуток времени 1 год. В нашем случае под фазовой траекторией будем понимать дискретную совокупность точек на фазовой плоскости, определяемую фазовыми координатами в заданной временной последовательности, соответствующей циклам наблюдений. Все фазовые траектории можно разделить на три группы по занимаемой площади на фазовой плоскости и положению на фазовой плоскости центра тяжести фигуры, описываемой этой траекторией. Под площадью, занимаемой фазовой траекторией на фазовой плоскости будем понимать точную нижнюю границу множества площадей выпуклых многоугольников, содержащих данную фазовую траекторию. Центр тяжести построенной фигуры может оказаться и точкой притяжения, однако ввиду недостаточности данных эту точку будем называть

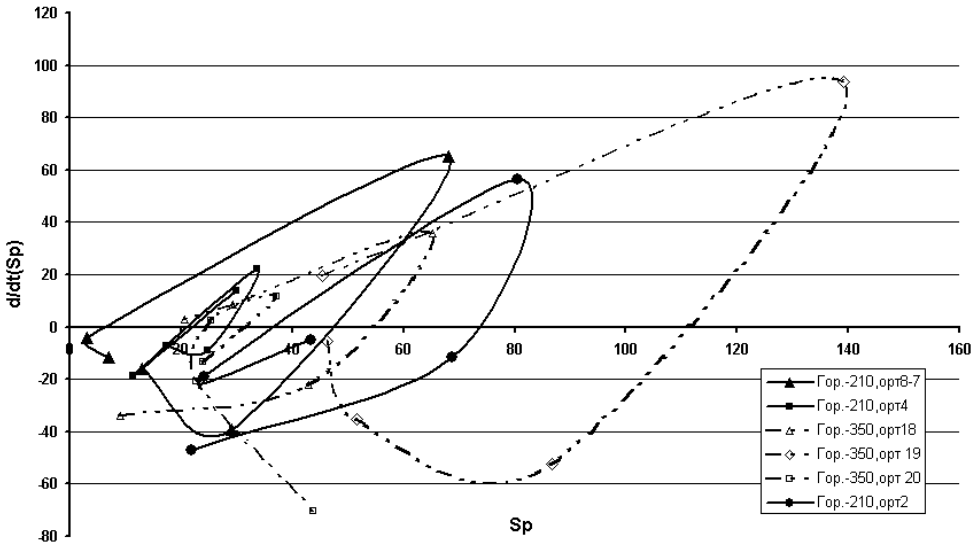


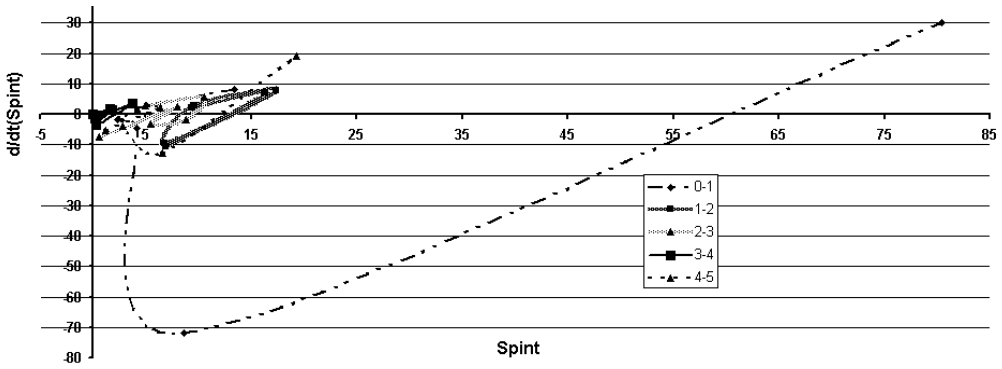
Рис. 1. Фазовый портрет состояния массива почвы околовыработочного пространства для различных выработок. Частота 20 кГц

центром тяжести фигуры, описываемой фазовой траекторией.

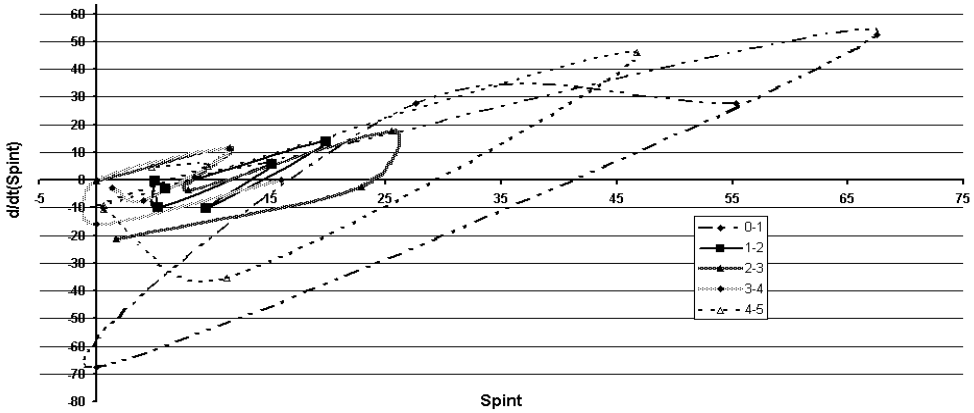
Выделенные три группы по новым признакам полностью совпадают с произведенной ранее классификацией по параметру Spint: устойчивые массивы (гор. –210, орт 4) - наименьшая площадь фигуры, описываемой фазовой траекторией, квазиустойчивые (гор. –210, орт 2), (гор. –350, орт 18) – промежуточная по размерам площадь, занимаемая фазовыми траекториями и неустойчивые (гор. –350,орт 19) - максимальная площадь, занимаемая фазовыми траекторией. Из полученного нами результата фазовая траектория для массива (гор. –350, орт 20, рис. 1) сильно отклонилась по данным 2005 г. от предыдущей ее локализации за 5 циклов наблюдений. Это может свидетельствовать об активизации массива и о переходе состояния массива в класс квазиустойчивых. Особый интерес представляет анализ фазовой траектории для массива гор. –210, ортов 7–8 с использованием фазовых координат Sp и d/dt(Sp). Площадь, занимаемая фазовой траекторией для этого массива незначительно отличается от соответствующих площадей фазовых траекторий для квазиустойчивых массивов (рис. 1). В то время как в пределах этого орта происходили значительные по энергетике динамические явления – тектонические горные удары. С другой стороны в классификации по параметру Spint этот массив был отнесен к неустойчивым массивам.

Рассмотрим фазовые портреты, построенные с использованием параметра поинтервального распределения интенсивности Spint. (рис. 2, *а-в*).

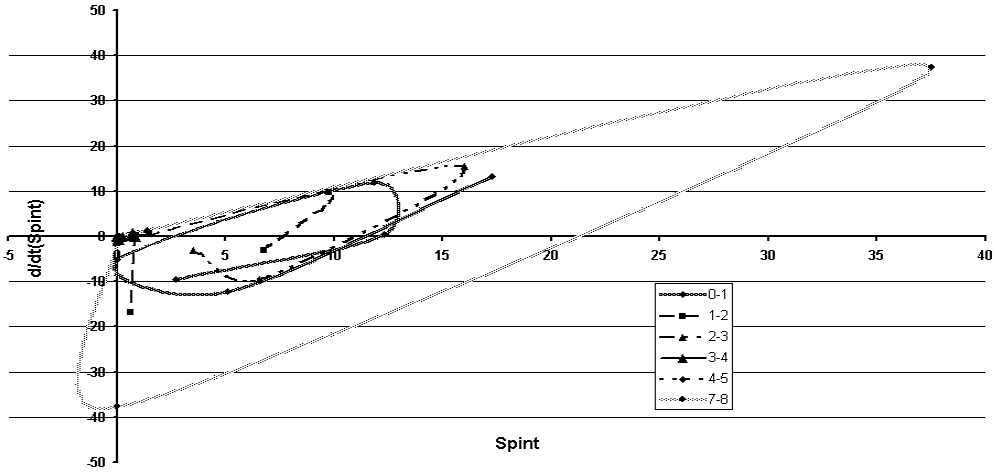
Что касается массива орт 20, гор. – 350 (рис. 2, *а*), видно, что резкое увеличение площади фазовой



а



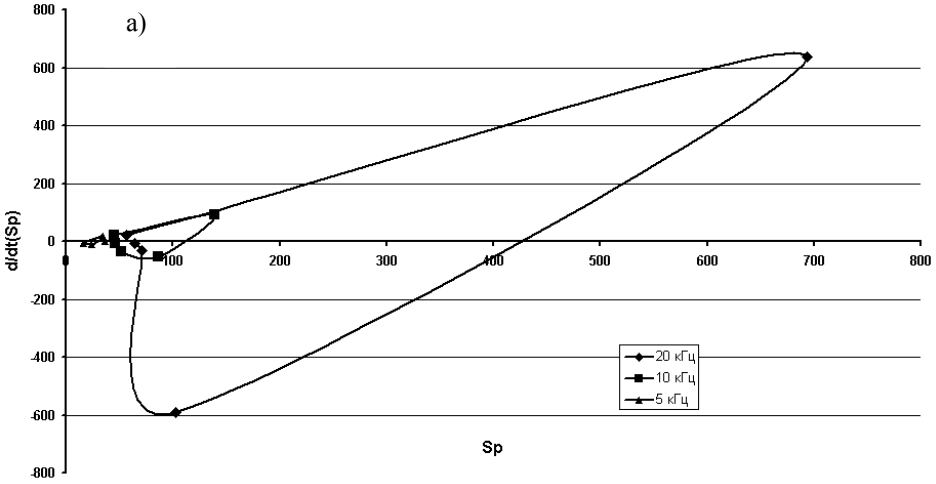
б

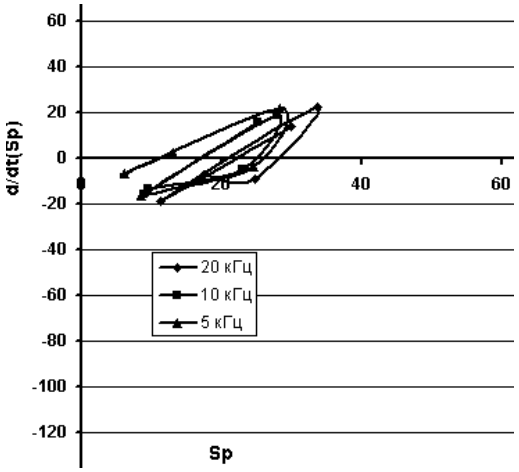


в

Рис. 2. Фазовые поинтервальные портреты: а - гор. –350, орт 20, б - гор. –350, орт 19, в - гор. –210, орт 7–8. Частота 20 кГц

В легенде указаны интервалы в метрах от контура выработки





б)

Рис. 3. Частотная дисперсия фазовых портретов состояния массивов: а) – горизонт –350, орт 19; б) – горизонт –210, орт 4

траектории наблюдается в слое, ближайшем к контуру выработки, в последние два цикла наблюдений. Это может быть предвестником незначительных динамических явлений, которых можно избежать, усилив крепь выработки.

Фазовый поинтервальный портрет массива орт 19, гор. –350 (рис. 2б) демонстрирует различие площадей описываемых фазовыми траекториями на различных уровнях от контура выработки. Так, на первом интервале и на пятом интервале имеют место наибольшие значения этих площадей. Так как выбранные нами фазовые координаты характеризуют поинтервальную активизацию и поинтервальную скорость активизации массива, мы можем связать эффект увеличения площадей фигур, описываемых фазовыми траекториями с увеличением интенсивности диссипативных процессов в массиве в соответствующих интервалах. Это предположение следует в дальнейшем проверить на более обширном материале. При этом центр тяжести фигуры, описываемой фазовой траекторией для пятого интервала сильно сдвинута в область больших значений фазовых координат, что может характеризовать боль-шую потенциальную склон-

ность к диссипативным процессам, приводящим к значительным динамическим явлениям в массиве. На промежуточных интервалах фазовые траектории располагаются подобно квазиустойчивым массивам.

И, наконец, анализ фазового поинтервального портрета состояния массива орт 8–7, гор. –210 показывает, что значительная неустойчивость массива была следствием резкой неоднородности поинтервальной склонности к диссипации энергии. На интервале с 3 до 7 м фазовые траектории располагаются практически вблизи нуля фазовой плоскости. В то время как на интервале 7–8 м происходили значительные диссипативные процессы, которые в течение последних 2–3 циклов, практически прекратились, поскольку фазовая траектория приблизилась также к нулю.

Резкий эффект частотной дисперсии на фазовом портрете состояния массива может свидетельствовать о значительном влиянии внешнего фактора на массив (гор. –350, орт 19) (рис. 4б), что также может способствовать неустойчивости массива, в то время как для устойчивого массива гор. –210, орт 4 (рис. 4а) частотная дисперсия практически отсутствует. Дальнейшие исследования должны уточнить природу этого внешнего управляющего параметра или внешнего фактора.

Заключение.

Массив горных пород является открытой динамической системой. В настоящей работе этот тезис продемонстрирован количественно путем анализа фазовых портретов с использованием фазовых координат в виде параметров 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.

На сегодняшний день вопрос о топологической эквивалентности построенных фазовых траекторий, следуя определению, приведенному выше, остается открытым. Исследовать этот вопрос можно будет при увеличении количества фазовых данных. Представляет интерес дальнейшие исследования состояния массива с использованием подходов теории динамических систем продолжить для выяснения критериев смены режимов диссипативности для реальных горных массивов, находящихся под сильным техногенным воздействием.

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта с СО РАН и программы по ОНЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Физическая* макромеханика и компьютерное конструирование материалов. 1995 Новосибирск, Наука Т.1 СИФР, С. 365.

2. *Хачай О.А., Хачай О.Ю.* Новый метод оценки и классификации устойчивости массива горных пород с использованием парадигмы физической мезомеханики. // Вопросы теории и практики интерпретации гравитационных магнитных и электрических полей. Материалы 33-й сессии Международного семинара им. Д.Г.Успенского, Екатеринбург, 30 января–3 февраля 200 г., с. 405–413.

3. *Хачай О.А.* К вопросу об изучении строения и состояния геологической гетерогенной нестационарной среды в рамках дискретной иерархической модели // Российский геофизический журнал , 2004, № 33–34. – С.32–37.

4. *Хачай О.А., Влох Н.П., Новгородова Е.Н., Хачай А.Ю., Худяков С.В.* Трехмерный электромагнитный мониторинг состояния массива

горных пород. // Физика Земли, 2001, №2, с. 85–92.

5. *Хачай О.А., Хачай О.Ю.* Изучение явления самоорганизации в массивах удароопасных шахт с использованием активного электромагнитного мониторинга. // Горный Информационно-аналитический бюллетень, 2005. – С. 92–100.

6. *Хачай О.А.* Изучение самоорганизации в иерархических структурах на основе данных пространственно-временного электромагнитного мониторинга удароопасных массивов горных пород. // Российский геофизический журнал, 2005, № 37–38. – С. 24–28.

7. *Хачай О.А.* Математическое моделирование динамического сейсмического отклика от дискретных упругих изотропных включений в N-слойную упругую изотроп-

ную среду в рамках частотно-геометри-ческой методики. // Международная конференция "Тихонов и современная математика", МГУ РАН.Москва 19–25 июня 200 г.(тезисы докладов секции математическая геофизика). – С. 39–41.

8. *Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай О.Ю.* Новая методика обнаружения зон дезинтеграции в околовыработочном пространстве массивов горных пород различного вещественного состава. // Горный информационный аналитический бюллетень. 2003, №11. – С. 26–29.

9. *Хачай О.А., Хачай О.Ю.* Метод оценки и классификации устойчивости массива горных пород с позиции теории открытых динамических систем по данным геофизического мониторинга. // Горный информационно-аналитический бюллетень. N6. 2005. – С. 131–142.

10. *Чуличков А.И.* Математические модели нелинейной динамики. М.: Физматлит. 2003. – С. 294. ГИАБ

Коротко об авторах

Хачай О.А. – Институт геофизики УрО РАН,
Хачай О.Ю. – Уральский государственный университет.

Доклад рекомендован к опубликованию семинаром № 3 симпозиума «Неделя горняка-2007».
Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Л. Шкуратник.*

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»			
АДАМКОВ Аркадий Викторович	Разработка и обоснование параметров врубоблочного способа разрушения угольного массива при проведении подготовительных выработок	25.00.22	к.т.н.