

---

© О.А. Хачай, О.Ю. Хачай,  
В.К. Климко, О.В. Шипеев,  
2010

УДК 622.83+ 530.1(075.8)

**О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Климко, О.В. Шипеев**

**ОТРАЖЕНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД  
ПОД ТЕХНОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
В ДАННЫХ ШАХТНОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО  
КАТАЛОГА**

*Впервые проанализирована сейсмологическая детальная шахтная информация с позиции синергетики и теории открытых динамических систем. Используя качественный анализ фазовых траекторий показаны повторяющиеся закономерности, заключающиеся в переходах состояния массива из хаотического в упорядоченное и обратно. Сформулирована физическая постановка задачи для моделирования применительно к массивам горных пород, находящихся под техногенным воздействием.*

*Ключевые слова:* консервативные и диссипативные системы, зоны дезинтеграции, фазовый портрет.

**Семинар № 3**

**Т**ехнология отработки рудных глубокозалегающих месторождений предусматривает проведение профилактических и контролирующих безопасность отработки мер. Для этого на ряде крупнейших горнодобывающих предприятий России установлены многоканальные автоматизированные системы контроля сейсмичности в пределах шахтных полей, вызванной ведением подземных горных работ [1]. Анализ обширного банка данных сейсмических записей толчков и горных ударов, зарегистрированных сейсмостанцией «Норильск» на рудниках Норильского месторождения с использованием предложенного ранее метода анализа [2] позволил обнаружить пульсирующий режим сейсмоэнерговыделения из напряженных участков рудного и породного массивов с движением фронтов индуцированной сейсмичности по типу колеблющегося маятника. [3]. В развитие результата

[3], были проведены исследования по изучению переходного процесса перераспределения напряженного и фазового состояний массива между сильными техногенными воздействиями на Таштагольском подземном руднике [4]. В качестве изучаемых параметров сейсмологического мониторинга рассмотрены значения суммарной энергии, выделяемой массивом конкретного блока отработки в виде динамических явлений, после каждого массового взрыва  $\lg(E_v)$ , значения поглощаемой массивом этого же блока энергии  $\lg(E_p)$  и максимального объема  $\lg(V_{max})$  шахтного поля, где происходят динамические явления от данного массивового взрыва, т. е. проанализирован переходный процесс энерговыделения массивом в виде отклика на техногенное воздействие — массивный или технологический взрыв для осуществления той или иной технологической процедуры (подсечка, отрезка, ком-

пенсация, обрушение) в блоке отработки. Проведенный анализ данных сейсмологического детального шахтного каталога позволяет сделать следующие выводы: — при отработке конкретного блока массива весь массив шахтного поля испытывает изменение напряженно-деформированного и фазового состояний от взрыва к взрыву; — количество поглощаемой и отдаваемой массивом энергии не равно друг другу и поэтому в массиве происходит накопление энергии; — процесс отдачи энергии происходит с запаздыванием и сильно зависит от градиента поглощаемой энергии от массивовых взрывов; — в массиве возникают зоны динамического затишья; эти зоны следует отслеживать с помощью данных сейсмологического мониторинга, используя предложенные нами параметры; — после выхода из минимума затишья необходимо в течение недели или двух недель до момента технологического обрушения проводить пространственно-временной активный электромагнитный или сейсмический мониторинг по выявлению зон потенциальной неустойчивости второго ранга;

• эти зоны могут быть после массивного взрыва, приуроченного к обрушению, источниками сильных динамических явлений; — введение в систему отработки предлагаемого комплексного пассивного и активного геофизического мониторинга, нацеленного на изучение переходных процессов перераспределения напряженно-деформированного и фазового состояний может способствовать предотвращению катастрофических динамических проявлений при отработке глубокозалегающих месторождений. Эти выводы сделаны по анализу сейсмологических данных пространственно связанных с массивом конкретного блока отработки.

Однако анализ всего сейсмологического каталога показывает, что сильные динамические явления (горные удары) могут происходить в более широкой области, нежели непосредственно блок отработки и могут быть инициированы с запаздыванием во времени. В течение 9 лет с 2000 по 2008 гг. в шахте Таштагольского рудника на четырех горизонтах в ряде выработок производился активный электромагнитный индукционный мониторинг в рамках частотно-геометрической методики. На основе этих детальных данных и последующей их интерпретации был разработан метод оценки и классификации массива околовыработочного пространства в пределах выработки его устойчивости по трем степеням относительно сильных техногенных воздействий при отработке крупных и супер крупных месторождений. В результате чего была осуществлена положительная заверка прогноза места и оценки магнитуды разрушительного динамического явления в шахте Таштагольского рудника [5].

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 можновести геофизическими методами, настроенными на многоранговую иерархическую модель среды. Этот вывод удовлетворяет принципам парадигмы физической мезомеханики, введенной академиком Паниным В.Е. и его школой [6], которые являются и конструктивным средством для изучения состояния нестационарной геологической среды, являющейся откры-

той динамической системой [7—9]. Использование попланшетной многоуровневой индукционной электромагнитной методики с контролируемым источником и соответствующей методики обработки и интерпретации позволило выявить зоны дезинтеграции, являющиеся индикатором устойчивости массива [10]. 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 циклическую положения максимума параметра  $S_{\text{pint}}$  в зависимости от расстояния от контура выработки  $Z_{\text{max}}$ . Анализ дисперсии от частоты  $Z_{\text{max}}$  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  $S_p$  [11]. В работе [12] показана возможность использования математических результатов разработанной физико-математической теории изучения состояния открытых динамических консервативных и диссипативных систем [13–17], к которым относятся также массивы горных пород, находящихся в процессе отработки. 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 [13]. 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. 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  $R_{N1}$ , 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. Стa-

ционарные незатухающие 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.

Полученные ранее результаты изучения фазового состояния массива горных пород [11] свидетельствуют о том, что классифицирование массива по его устойчивости и дальнейший ее контроль можно весьма эффективно вести с использованием параметра  $Spi_{nt}$  — интервалной интенсивности неоднородностей второго ранга или, по принятой в геомеханике терминологии, зон дезинтеграции. Кроме то-

го, 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  $Spi_{nt}$  и  $d/dt(Spi_{nt})$ , а также  $Sp$  и  $d/dt(Sp)$ , определенные по семи циклам активного электромагнитного индукционного мониторинга.

Под символами  $d/dt(Spi_{nt})$  и  $d/dt(Sp)$  будем понимать разность последовательных (по времени) значений, промежуток времени 1 год. 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 центром тяжести фигуры, описываемой фазовой траекторией.

Выделенные три группы по новым признакам полностью совпадают с произведенной ранее классификаци-



**Рис. 1. Распределение во времени поглощенной сейсмической энергии в результате отработки массива технологическими и массовыми взрывами.**

Ось ОY:  $D = \Sigma \lg(E_p(N))$ , N-промежутки времени в сутках (ось ОX)

ей по параметру Spint: устойчивые массивы (гор. -210, орт 4) — наименьшая площадь фигуры, описываемой фазовой траекторией, квазистойчивые (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 траекториями.

Таким образом в работе [12] тезис о том, что массив горных пород является открытой динамической системой, состояние которой определяется синергетическими свойствами, 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. Представляет интерес дальнейшие исследования

ния состояния массива с использованием подходов теории динамических систем продолжить для 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 2008г. 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. В нашем анализе все шахтное поле было разделено на две половины: выработки северо-западного участка, районы стволов Западная и Ново-Капитальная и выработки с 0 по 14 обозначены нами, как северный участок; выработки с 15 по 31 и южный вентиляционный и полевой штреки, ствол Южной шахты

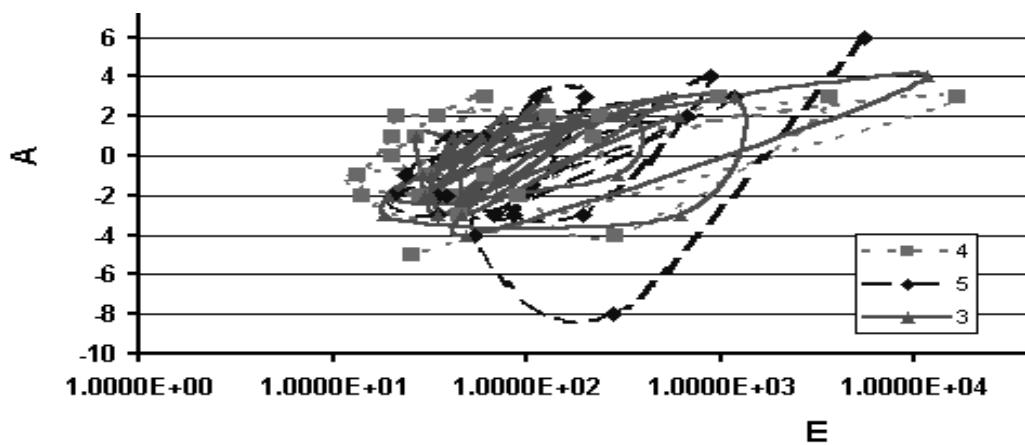


Рис. 2. а

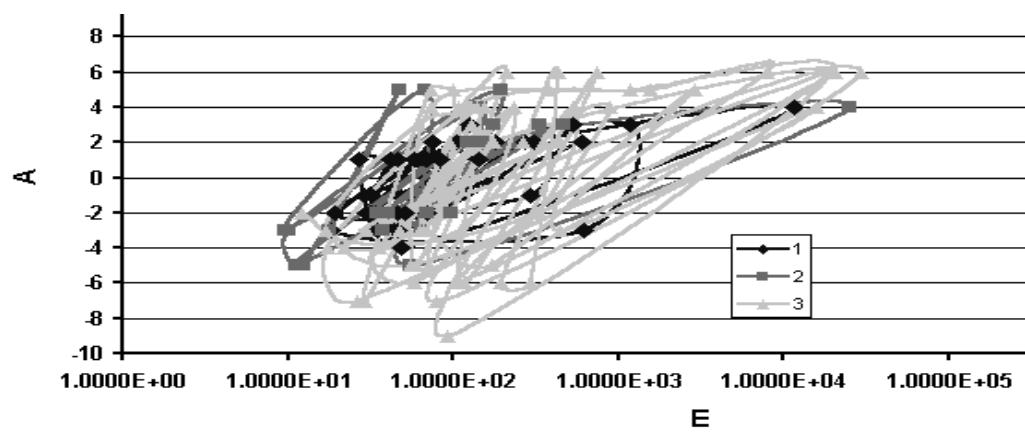


Рис. 2. б

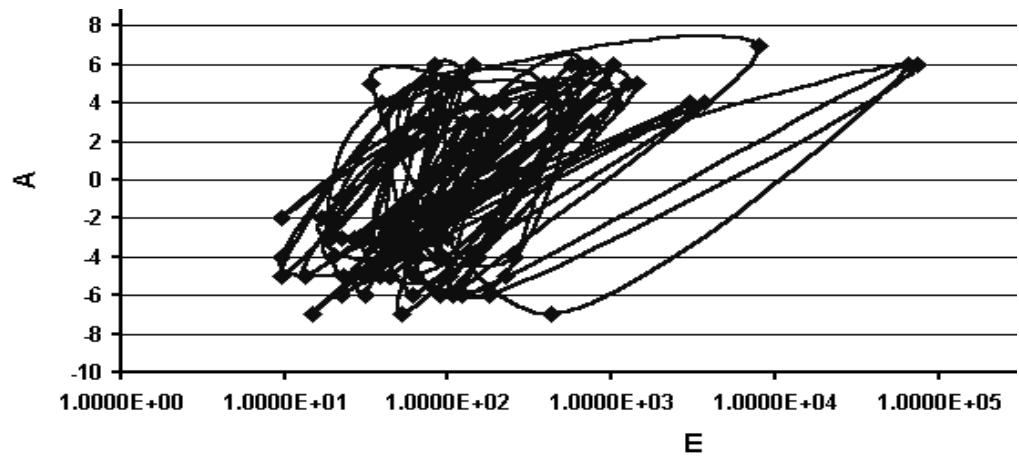


Рис. 2. в

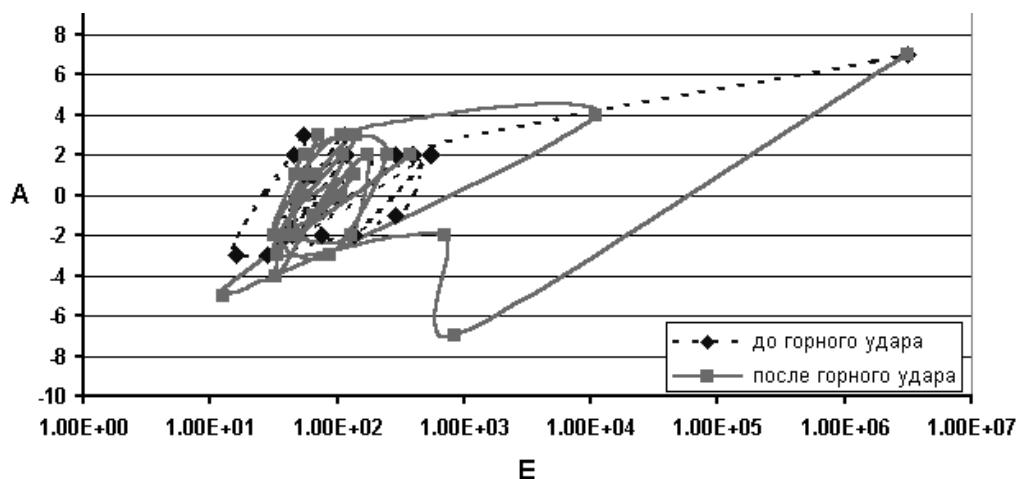


Рис. 2, г

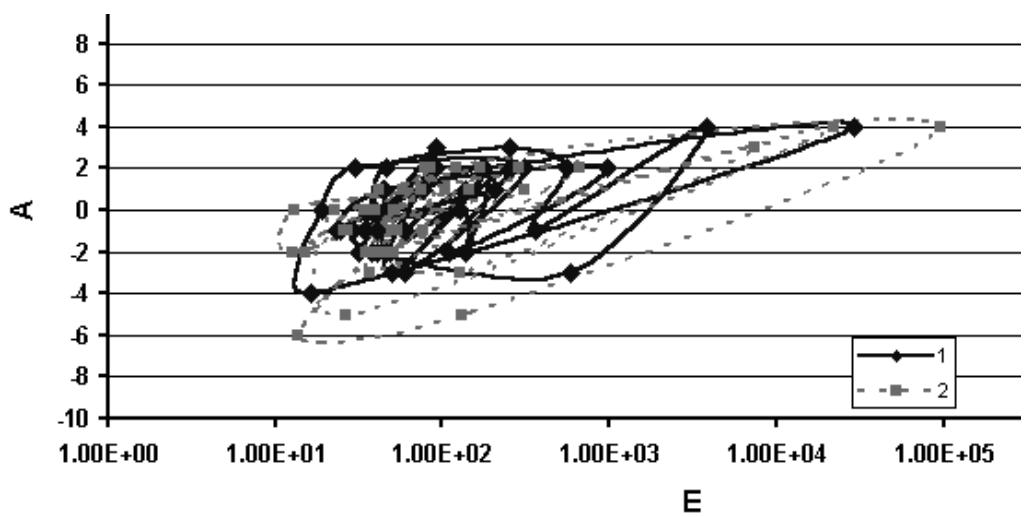


Рис. 2, д

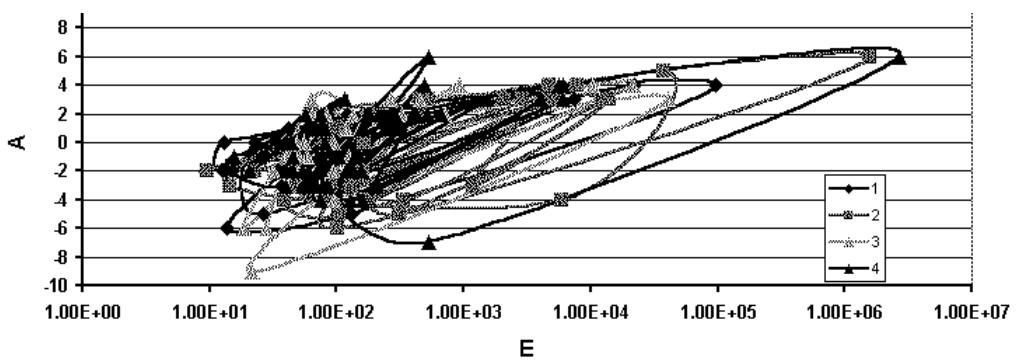


Рис. 2, е

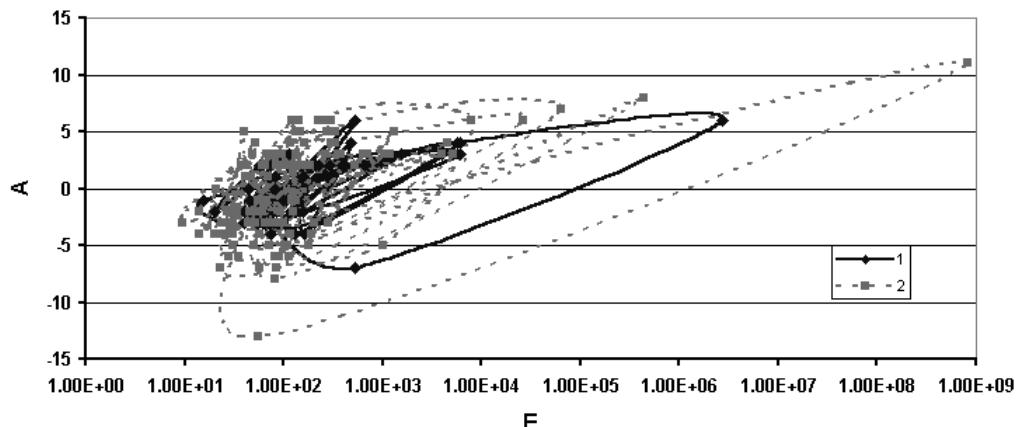


Рис. 2. ж

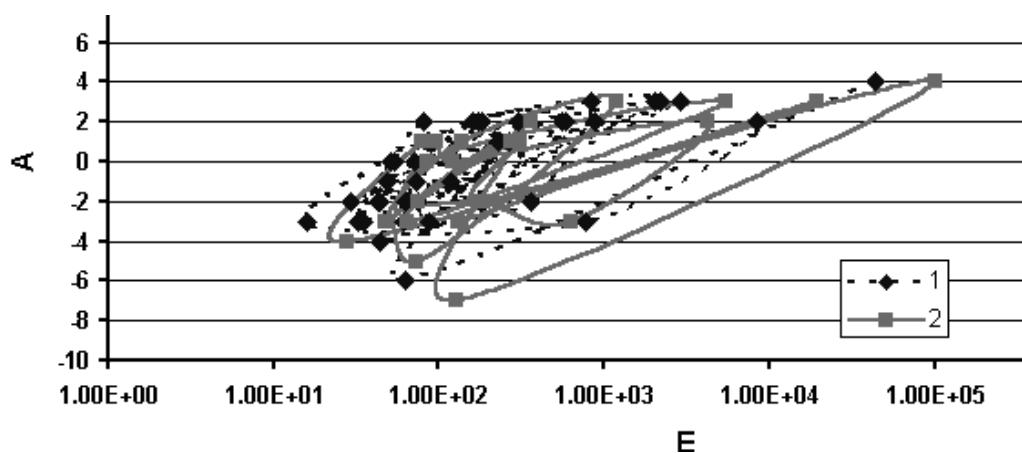


Рис. 2. з

**Рис. 2. Фазовые портреты откликов состояния массива за последовательные промежутки времени:** а — 5-24.09-29.09, 4-01.10-13.10, 3-14.10-12.11 2006 г.; б — 1-14.10-12.11, 2-12.11-18.11, 3-19.11-25.11 2006 г.; в — 24.12-29.12 2006 г.; г — 01.01-28.01 2007 г.; д — 1- 29.01-31.03, 2-02.04-25.05 2007 г.; е — 1-02.04-25.05, 2-25.06-19.07, 3-22.07-27.09, 4-27.09-24.11 2007 г.; ж — 1-30.09-24.11, 2-25.11-29.12 2007 г.; з — 1-29.12 2007-21.04 2008г., 2-01.06-05.08 2008 г.

обозначены как южный участок. Учитывались все события-отклики с горизонтов -140 м, -210 м, -280 м, -350 м. Согласно каталогу взрывы производились на юго-восточном участке отработки шахты на горизонтах +70 м, 0 м, -70 м, на остальных участках — на перечисленных выше горизонтах. В качестве данных использова-

лись пространственно-временные координаты всех динамических явлений, происходивших в пределах шахтного поля и зафиксированные сейсмической станцией, а также их энергетические характеристики.

Фазовые портреты состояния массивов северного и южного участков построены в координатах  $E_v(t)$  и  $d(E_v(t))/dt$ ,

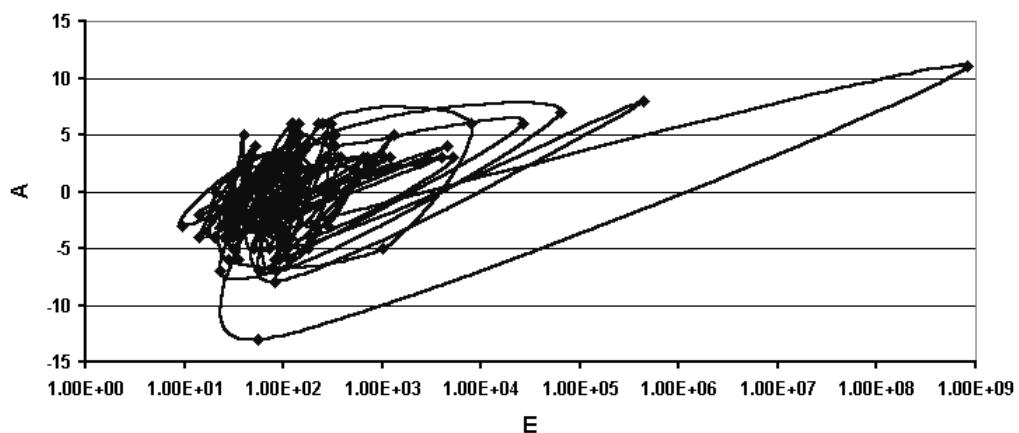


Рис. 3. а

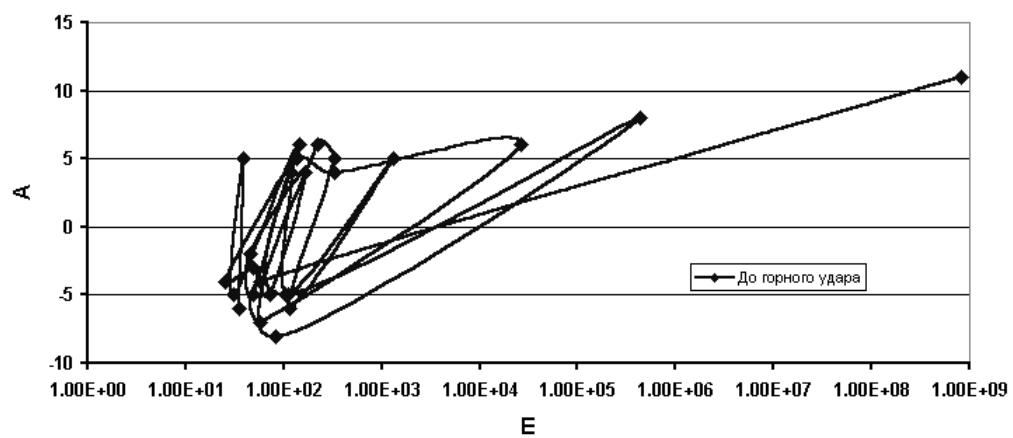


Рис. 3. б

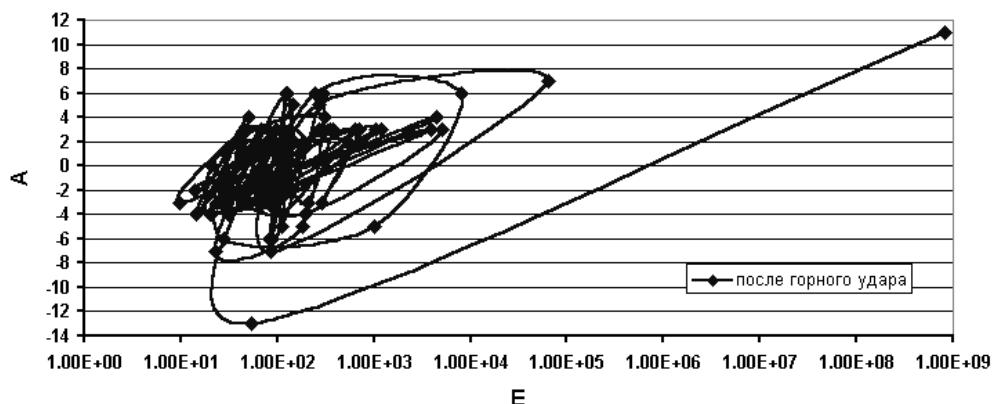


Рис. 3. в

**Рис. 3. 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. Обозначения по осям те же, что и на рис. 2

$t$ -время, выраженное в долях суток, Ев-выделенная массивом сейсмическая энергия в дж. В этой работе мы сначала проанализируем морфологию фазовых траекторий сейсмического отклика в различные последовательные промежутки времени южного участка шахты по двум причинам: 1- по данным о произведенным технологическим и массовым взрывам (рис. 1) большая часть энергии была закачана именно в южный участок шахты, 2- в конце 2007 года именно в южном участке произошел один из самых сильных горных ударов за всю историю работы рудника.

На рис. 2, а-2, з прослежена эволюция изменения морфологии фазовых траекторий отклика массива на техногенные воздействия с середины 2006г. по середину 2008 г.

На рис. 2, в представлена характерная морфология фазовых траекторий отклика массива, находящегося локально во времени в устойчивом состоянии: имеется локальная область в виде клубка переплетенных траекторий и небольшие выбросы от этого клубка, не превышающие по энергии значений  $10^5$  дж. Эта же особенность проявляется на всех представленных рис. 2, г-з за исключением того, что в некоторые промежутки времени этот выброс превышает  $10^5$  дж., достигая  $10^6$  дж (рис. 2, г, е) и даже  $10^9$  дж (рис. 2, ж). 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 (например, рис. 2, г). Интересно отметить, что после этого сброса система возвращается снова в эту же притягивающую фазовые траектории область.

Представляет интерес проанализировать более детально фазовые траектории сейсмического отклика массива до и после самого сильного горного удара (рис. 3, а—в).

Ось ОХ- выделенная массивом энергия в дж. За соответствующие промежутки времени. Ось ОY-  $d(\lg E)/dt$ ,  $t$ -время в долях суток.

Весь процесс описывается тремя притягивающими фазовыми областями: большое количество фазовых пересекающихся траекторий малоэнергетической области, несколько резонансных выбросов средней энергии, которые как предшествуют сильному энергетическому резонансу (рис. 3, б), так и следуют после сильного энергетического резонанса (рис. 3, 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 подобным образом, отражая слаженный или совместный механизм освобождения накопленной энергии (рис. 4, а-б). Полученные первые результаты анализа детального сейсмологического каталога с точки зрения математических основ синергетики и открытых динамических систем, обладающих свойствами нелинейности и диссипативности [14—17] приводят нас к необходимости постановки новой задачи математического моделирования, отличной от имевшей место ранее постановки.

Если раньше исследовалась задача о переходе системы от упорядоченного состояния к хаосу, то в нашем случае, для нашей системы хаос заданного уровня является с одной стороны устойчивым состоянием для системы, а с другой стороны этот параметр

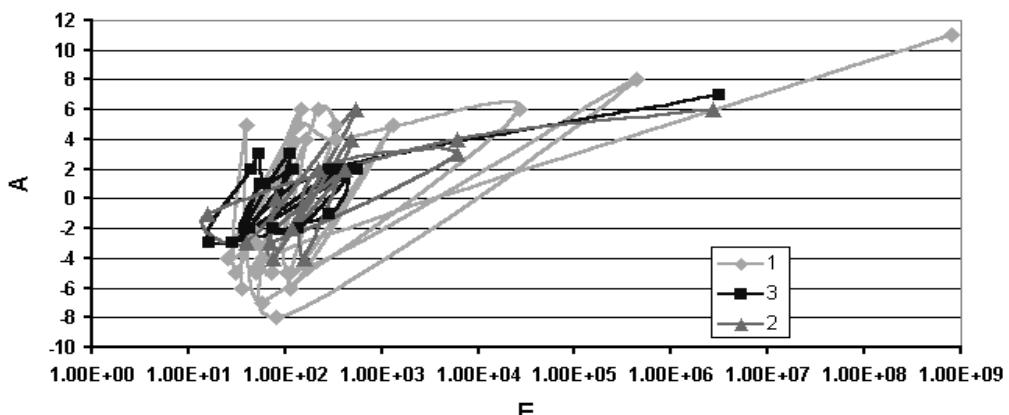


Рис. 4. а

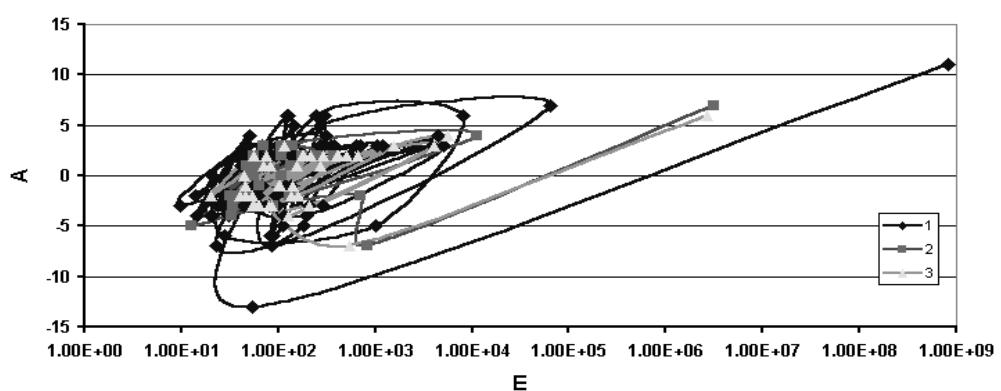


Рис. 4, б

**Рис.4.** Сопоставление фазовых портретов отклика состояния массива до и после горных ударов различной интенсивности и в различные промежутки времени 2007 г.: а — 1-25.11, 2-01.01-13.01, 3-27.09-11.10; б — 1-25.11-29.12, 2-13.01-28.01, 3-11.10-24.11. Обозначения по осям те же, что на рис. 2

является управляющим для перехода системы в состояние с другим параметром, являющимся для нее катастрофическим. После реализации этой катастрофы система вновь создает область хаоса с параметром, близким по значению к первому. Этот процесс отличается от бифуркационного, т. к., в пространстве изученных нами распределений фазовых траекторий существует единственная притягивающая точка в

плоскости выделенной энергии и производной по времени от логарифма выделенной энергии. Таким образом дальнейшее изучение детального сейсмического каталога позволит сформулировать критерии прогноза поведения горного массива с точки зрения математической теории синергетики [18]. Этот же подход может быть использован и для анализа сейсмологических данных на сейсмологических полигонах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 07-05-00149а и ИП УрО и СО РАН.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курленя М.В., Опарин В.Н., Востриков В.Н. и др. Стратегия развития автоматизированной системы контроля геодинамической безопасности на рудниках ОАО Горно-металлургическая компания «Норильский никель»// Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. Межд. конф. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2001.
2. Курленя М.В., Опарин В.Н., Еременко А.А. Об одном методе сканирования шахтной сейсмологической информации // ДАН. 1993, Т.333, № 6.
3. Опарин В.Н., Востриков В.И., Жилкина Н.Ф., Тапсиев А.П., Аршавский В.В. О пульсирующем режиме сейсмоэнерговыделения из напряженных участков шахтных полей.// Проблемы и перспективы развития горных наук. Тр. Межд. конф. Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 2005. Т.1. С.7-16
4. Хачай О.А., Хачай О.Ю., Климко В.К., Шипеев О.В. Проблема пространственно-временного прогноза устойчивости удароопасных массивов при их отработке взрывными технологиями. // Горный информационно-аналитический бюллетень МГГУ.2008. № 3. С.121-129.
5. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Методика пространственно-временного прогноза устойчивости удароопасных массивов при их отработке взрывными технологиями. // Геомеханика в горном деле. Доклады Всероссийской конференции 10-11 октября 2007г. Екатеринбург УрО РАН. 2008, с.40-49.
6. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск, Наука Т.1 СИФР.1995. 365с.
7. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Изучение явления самоорганизации в массивах удароопасных шахт с использованием активного электромагнитного мониторинга. // Горный Информационно-аналитический бюллетень Москва, МГГУ. 2005. № 5. С.92–100.
8. 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.
9. Хачай О.А. Геофизический мониторинг состояния массива горных пород с использованием парадигмы физической мезомеханики. // Физика Земли, 2007. № 4. С. 58-64.
10. Хачай О.А., Новгородова Е.Н., Хачай О.Ю. Новая методика обнаружения зон дезинтеграции в околовыработочном пространстве массивов горных пород различного вещественного состава. // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГТУ. 2003. № 11. С.26–29.
11. 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. МГТУ. 2005. №6. С. 131–142.
12. Хачай О.А., Хачай О.Ю. Теоретические подходы к обоснованию систем геофизического контроля состояния геологической среды при техногенном воздействии. // Горный информационно-аналитический бюллетень МГТУ.2008. № 1. С.161-169.
13. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. М.: Физматлит.2003. 294с.
14. Олемской А.И., Кацнельсон А.А. Синергетика конденсированной среды. М.: Едиториал УРСС, 2003. 336с.
15. Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем. М.: Янус-К.2002. 282с.
16. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики. М.: Изд-во ЛКИ.2007.312с.
17. Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. Структуры и хаос в нелинейных средах. М.: Физматлит. 2007. 488 с. ГИАБ

### Коротко об авторах

Хачай О.А. — старший научный сотрудник, Институт геофизики УрО РАН, e-mail: olga.hachay@r66.ru;

Хачай О.Ю. — ассистент кафедры «Математический анализ и теория функций», Уральский государственный университет, e-mail: khachay@mail.ru;

Климков В.К. — кандидат технических наук, зам. директора филиала ОАО ЕВРАЗхолдинга, Таштагольский подземный рудник;

Шипеев О.В. — кандидат технических наук, филиал ОАО ЕВРАЗхолдинга. Таштагольский подземный рудник.