

УДК 622.83+ 530.1(075.8)

Хачай Ольга Александровна

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт геофизики
имени Ю.П. Булашевича УрО РАН,
620016 г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100
e-mail: olgakhachay@yandex.ru

Хачай Олег Юрьевич

кандидат физико-математических наук,
доцент,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
e-mail: khachay@yandex.ru

**НОВЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ШАХТНОЙ
СЕЙСМИЧНОСТИ С УЧЕТОМ
ИЕРАРХИЧНОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ
ГОРНОГО МАССИВА***Аннотация:*

Показано, что процессом отработки горного массива, являющимся динамическим процессом, можно управлять следуя рекомендациям, которые дает теория катастроф. У этого процесса в качестве управляющих параметров рассматриваются значения энергии при взрывах и местоположение этих взрывов относительно изучаемой или обрабатываемой области массива. В качестве внутренних параметров выступают кинематические и динамические параметры деформационных волн, а также структурные особенности массива, через которые проходят эти волны. Использование методов анализа для краткосрочного и среднесрочного прогноза состояния горного массива только при использовании управляющих параметров недостаточно при наличии резкой его неоднородности. Однако совместное использование качественных рекомендаций теории катастроф и пространственно-временных данных изменения внутренних структурно-иерархических параметров массива позволит предотвратить катастрофы при отработке шахтных массивов.

Ключевые слова: теория катастроф, нелинейная динамическая среда, слоисто-блоковый массив с включениями иерархического типа, управляющие и внутренние параметры, акустический и электромагнитный мониторинг.

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.089

Khachay Olga A.

Dr. of physico-mathematical sciences,
leading scientist,
The Institute of geo-physics UB RAS,
620216 Yekaterinburg,
100 Amundsen st..
e-mail: olgakhachay@yandex.ru

Khachay Oleg Yu.

Candidate of physico-mathematical sciences,
associate professor,
Ural Federal University,
620002, Yekaterinburg, 19 Mira st
e-mail: khachay@yandex.ru,

**NEW MONITORING SYSTEMS
FOR MINE-SEISMICITY SUBSTANTIATION
WITH DUE REGARD FOR ROCK MASS
HIERARCHICAL HETEROGENEITY***Abstract:*

It is shown that the mining process, which is a dynamic one, can be controlled by following the recommendations given by the catastrophe theory. In this process the values of energy in explosions and the location of these explosions relative to the area of the array being studied or worked are considered as, controlled parameters. The kinematic and dynamic parameters of the deformation waves, as well as the structural features of the array through which these waves pass, act as internal parameters. The use of analysis methods for short-term and medium-term forecast of the state of a mountain rock mass only when using controlled parameters is not sufficient in the presence of a sharp heterogeneity. However, the joint use of qualitative recommendations of the theory of catastrophes and spatial-temporal data of changes in the internal structural hierarchical parameters of the array will allow preventing catastrophes during the mining of mine rock mass.

Key words: catastrophe theory, non-linear dynamic environment, layered block array with inclusions of hierarchical type, controlled and internal parameters, acoustic and electromagnetic monitoring.

Введение

Для продолжения геоинформационных исследований состояния горного массива использован разработанный алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога [1], позволяющий извлечь дополнительную важную информацию для прогноза опасных явлений в рудных глубоких шахтах [2] при их отработке

взрывными технологиями. Дополнительно акцентировано внимание на процессе подготовки резонансного выброса энергии, включающем не только непосредственное влияние взрывов, но и последовательное влияние слабоэнергетических откликов, которые, в свою очередь, проявляются в виде толчков, способствующих подготовке резонансного выброса. Используются информативные признаки подготовки высокоэнергетических динамических явлений: время запаздывания отклика на техногенные воздействия и объем формирования очага горного удара в виде градаций расстояний от предполагаемого очага. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога является важной для прогноза опасных явлений в рудных шахтах.

Настоящая работа посвящена использованию подходов математической теории катастроф для анализа данных сейсмологического шахтного каталога, отражающих степень устойчивости и ее потери горным массивом при активном на него воздействии. Одной из первых работ по изучению потери квазистатического равновесия горного массива с использованием математических методов теории катастроф была работа В.Н. Одищева [3]. Были получены важные теоретические результаты не только по оценке и прогнозу динамического состояния массива, находящегося под механическим воздействием, а и по оценке постдинамического состояния, которая особенно важна при планировании отработки массива после горного удара. Для практического использования этих результатов необходимо было организовать мониторинговые исследования напряжений не только на контуре массива, а и внутри массива, что достаточно трудоемко. На помощь приходит мониторинг волновых геофизических полей, содержащий одновременно информацию о структуре и формирующихся напряжениях в сложно построенной иерархической среде. Одной из таких баз данных является сейсмологический шахтный каталог.

С другой стороны, геологическая среда является открытой системой, на которую действуют внешние и внутренние факторы. Они приводят ее к неустойчивому состоянию, которое, как правило, проявляется локально в виде зон, называемых динамически активными элементами, которые являются индикаторами потенциальных катастрофических источников. Эти объекты отличаются от вмещающей геологической среды своими структурными формами, которые часто являются формами иерархического типа. Процесс их активизации может наблюдаться с помощью мониторинга волновых полей, для математического обеспечения которого разработаны новые алгоритмы моделирования с использованием метода интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. Разработан новый подход к интерпретации волновых полей для определения контуров или поверхностей локально напряженных иерархических объектов [4]. Получено явное уравнение теоретической обратной задачи для случаев рассеяния линейно поляризованной упругой волны в слоистой упругой среде с иерархическим упругим включением, плотность которого для всех рангов равна плотности вмещающего слоя. Построен итерационный алгоритм определения контуров несоосных включений k -го ранга в иерархической структуре с последовательным использованием решения прямой задачи вычисления упругого поля $k-1$ ранга. С увеличением степени иерархичности структуры среды увеличивается степень пространственной нелинейности распределения составляющих сейсмического поля, что предполагает исключение методов линеаризации задачи при создании методов интерпретации. Эта проблема неразрывно связана с решением обратной задачи для распространения сейсмического поля в таких сложных средах с использованием явных уравнений теоретической обратной задачи. Впервые выписано уравнение для определения поверхности аномально напряженного включения в иерархической слоисто-блоковой среде по данным акустического мониторинга. На практике с использованием этого алгоритма мы можем по данным акустического мониторинга локализовать область возможного очага горного удара либо готовящегося землетрясения и оценить степень аномальных упругих напряжений.

Настоящая работа посвящена использованию подходов математической теории катастроф для анализа данных сейсмологического шахтного каталога, отражающих степень устойчивости и ее потери горным массивом при активном на него воздействии.

*Обзор методов теории катастроф для изучения потери устойчивости
нелинейных динамических систем*

Первые сведения о теории катастроф появились в печати около 1979 г., где свидетельствовалось, что эта теория дает универсальный метод исследования всех скачкообразных переходов, разрывов, внезапных качественных изменений [5]. Следуя В.И. Арнольду [5], источниками теории катастроф являются теория особенностей гладких отображений Уитни и теория бифуркаций динамических систем Пуанкаре и Андронова. Понятие “бифуркация” означает раздвоение и употребляется для обозначения качественных перестроек различных объектов при изменении параметров, от которых они зависят. Катастрофами называются скачкообразные изменения, возникающие в виде внезапного ответа системы на плавное изменение внешних условий. Эволюционный процесс, отражающий отклик системы на приложенное воздействие, математически описывается векторным полем в фазовом пространстве [6]. Точка фазового пространства задает состояние системы, а приложенный в этой точке вектор указывает на скорость изменения состояния. Точки, в которых вектор обращается в нуль, называются положениями равновесия. С течением времени в системе могут устанавливаться колебания, при этом равновесное состояние становится неустойчиво.

Эволюционный процесс математически описывается векторным полем в фазовом пространстве, а точка фазового пространства задает состояние системы, при этом приложенный в этой точке вектор указывает на скорость изменения состояния. На фазовой плоскости установившиеся колебания изображаются замкнутой кривой, называемой предельным циклом. В работе [5] изучение эволюции динамической системы связано с изменением во времени внутренних и управляющих параметров. Схема большинства применений теории катастроф состоит в следующем: предполагается, что изучаемый процесс описывается при помощи некоторого числа управляющих и внутренних параметров. Состояния равновесия процесса образуют поверхность того или иного числа измерений в этом пространстве. Проекция поверхности равновесий на плоскость управляющих параметров может иметь особенности. Эти особенности получили название особенностей общего положения, а теория, связанная с этими особенностями, предсказывает геометрию “катастроф”, т.е. перескоков из одного состояния в другое при изменении управляющих параметров. Одна из наиболее известных особенностей – это сборка Уитни. В связи с этим после потери устойчивости равновесия могут наблюдаться два типа установившихся режимов. Один из них – колебательный периодический режим. Этот вид потери устойчивости называется мягкой потерей устойчивости, так как устанавливающийся колебательный режим при малой закритичности мало отличается от состояния равновесия. Второй вид связан со следующими особенностями: перед тем как установившийся режим теряет устойчивость, область притяжения этого режима становится очень малой, и случайные возмущения выбрасывают систему из этой области до того, как область притяжения полностью исчезает. Этот вид потери устойчивости называется жесткой потерей устойчивости, при этом система уходит со стационарного режима скачком и переходит на другой режим движения. Этот режим может быть другим устойчивым стационарным режимом, или устойчивыми колебаниями, или более сложным движением. Установившиеся режимы движения называются аттракторами. Те же из них, отличные от состояний равновесия и строго периодических колебаний, названы странными аттракторами и связаны с проблемой турбулентности [6].

Анализ данных шахтного сейсмологического активного мониторинга горного массива с опорой на схему применения теории катастроф

Основной целью этого мониторинга является определение предкритического состояния горного массива, находящегося под отработкой с помощью взрывных воздействий. Оно определяется величиной энергии отклика, не превышающего 10^4 Дж. Если эта величина превышает это значение в пределах 10^5 - 10^7 Дж, то состояние массива считается критическим. При значениях энергии отклика 10^8 - 10^9 и более состояние массива считается закритическим или катастрофическим.

25 ноября 2007 года в шахте Таштагольского рудника в 29 орту на глубине 714 м произошел горный удар с энергией $8,14 \cdot 10^8$ Дж. Постараемся проследить подготовку этого события с точки зрения потери устойчивости массива и связи этого эффекта с энергетическим воздействием взрывов и их места положения. Исследуемый объем заключен по оси OX: 25-31 выработка (≈ 240 м), по оси OY: (длина ортов между полевым и вентиляционным штреком в среднем ≈ 240 м), по оси OZ: (горизонты -140 , -425 , (≈ 590 - 875 м)).

Проанализируем морфологию временного процесса энергетических откликов массива, используя результаты анализа сейсмологического каталога с 4 июня 2006 г. по 25 ноября 2007 г.

4 июня 2006 г. – 13 августа 2006 г. Потеря устойчивости равновесия проявляется для четырех воздействий в виде колебательного процесса, при этом первый взрыв происходит в пределах исследуемого объема, однако энергия воздействия наименьшая из анализируемых четырех, поэтому максимальный энергетический отклик находится в пределах предкритических.

20 августа 2006 г. – 17 сентября 2006 г. Потеря устойчивости равновесия для двух воздействий проявляется классическим образом. Имеется отклик в виде практически постоянного распределения по времени энергии, переходящий в колебательный процесс, при этом энергия взрыва 3 сентября превосходила 10^8 Дж, а энергия взрыва 17 сентября 2006 г. – 10^6 Дж в пределах исследуемого объема, однако общий уровень выделяемой энергии откликами уменьшился и не превосходит 10^3 Дж.

24 сентября 2006 г. – 14 октября 2006 г. Реакция на взрыв в пределах исследуемого объема имеет другую морфологию, колебательный процесс перемежается скачкообразным выбросом, после которого система возвращается к колебательному процессу, фоновый уровень которого соответствует мягкой потере устойчивости. Последующие отклики на взрывы за пределами исследуемой области носят малоамплитудный по энергии колебательный характер. 14 октября 2006 г. морфология процесса на взрыв в исследуемой области носит классический характер мягкой потери устойчивости с затуханием колебательного процесса выделения энергии.

21 октября 2006 г. – 12 ноября 2006 г. Происходят взрывы в исследуемой области, однако морфология мягкой потери устойчивости массива проявляется более явно после взрыва 12 ноября. Почти сразу после взрыва начинается колебательный процесс выделения энергии, затем скачок, потом снова возврат в колебательное состояние и снова скачок с амплитудой, превышающей 10^4 Дж. Фоновый уровень энергетических колебаний повышается выше 10^2 Дж.

19 ноября 2006 г. – 17 декабря 2006 г. За пределами исследуемой области происходит взрыв с энергией больше 10^9 Дж, при этом исследуемый массив реагирует двумя скачкообразными выбросами энергии с величиной, соответствующей скачкам 12 ноября 2006 г. Последующий взрыв в исследуемой области 26 ноября 2006 г. вызывает отклик массива, характерный мягкой потере устойчивости на энергетическом фоне второго периода анализа. Следующий взрыв 3 декабря 2006 г. вызывает снова более возбужденный отклик с колебаниями и скачками аналогично рассмотренному выше отклику третьего периода анализа.

24 декабря 2006 г. – 21 января 2007 г. Взрыв в исследуемой области (вблизи места будущего горного удара) с энергией 10^8 Дж вызывает резкую, но еще в рамках критичной, потерю устойчивости массива, два скачка с энергией чуть меньше 10^5 Дж, 3 скачка с энергией 10^4 Дж – 10^3 Дж. Колебательный процесс имеет более интенсивный характер. Остальные взрывы, происходящие на достаточной удаленности от исследуемой области с 30 декабря 2006 г. по 14 января 2007 г., продолжают поддерживать колебательный процесс, вызванный взрывом 24 декабря. Взрыв 21 января с энергией меньше чем 10^5 Дж, происходящий также на большом удалении от исследуемой области, не помешал скачкообразному выбросу энергии, отражающему процесс затягивания релаксации системы.

25 марта 2007 г. – 8 апреля 2007 г. Взрывы происходят вне исследуемой области в основном на достаточно большом удалении. Поэтому отклик массива носит случайный неколебательный характер, и в основном энергия его не превышает 10^4 Дж, кроме отклика на взрыв от 1 апреля 2007 г., когда произошел скачок энергии чуть больше чем 10^4 Дж.

6 мая 2007 г. – 20 мая 2007 г. Взрыв произошел в северной части массива, затем 13 мая взрывы произошли одновременно в северной части и в исследуемой части массива (в орту, где в будущем произошел катастрофический горный удар), отклик массива имеет скачок энергии 10^5 Дж.

13 июня 2007 г. – 16 сентября 2007 г. Имеет место взаимодействие откликов исследуемого массива на воздействие взрывов, расположенных в основном вне исследуемой области, а при наличии взрыва внутри нее наблюдаются скачки энергии до 10^5 Дж без предварительного колебательного процесса.

30 сентября 2007 г. – 21 октября 2007 г. Происходят взрывы исключительно в исследуемой области недалеко от орта, где произошел катастрофический горный удар. Морфология распределения энергии откликов такова, что имеется низкоэнергетическая зависимость от времени и очень короткий колебательный процесс.

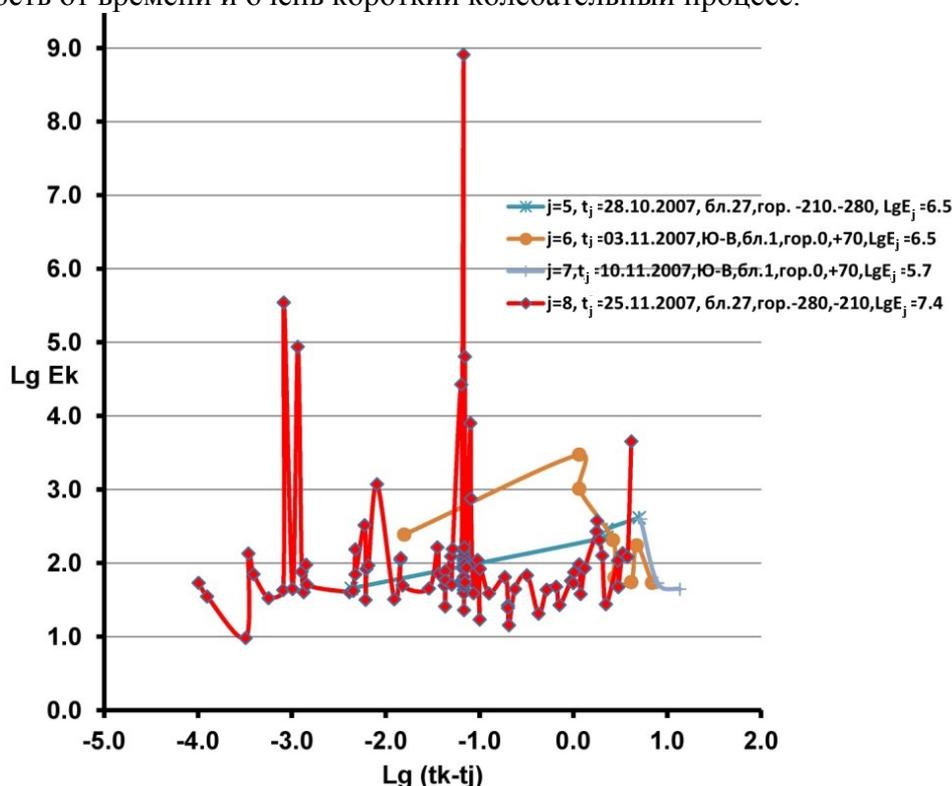


Рис. 1 – Морфология зависимости энергии E_k (Дж) отклика массива на взрывное воздействие во времени с 28 октября 2007 г. по 25 ноября 2007 г. Условные обозначения: t_k – время откликов массива, t_j – дата и время воздействия (в сутках), E_j – энергия воздействия (Дж)

Взрывы с 28 октября по 10 ноября не выводят исследуемую область массива на стадию колебательного процесса отдачи энергии. При повторном взрыве в блоке 27 25 ноября 2007 г. произошел сложный динамический катастрофический процесс. Имеют место три форшока, один афтершок, четыре предкритических и один закритический скачок энергии. Все эти проявления сопровождались малоэнергетичным колебательным процессом (рис. 1).

Заключение

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Еще раз убеждаемся, что процесс отработки горного массива является динамическим процессом. Теория катастроф предлагает рекомендации по управлению этим процессом. Для этого необходимо определить управляющие и внутренние параметры динамической системы, какой является горный массив, находящийся под взрывным воздействием. Как следует из данных сейсмологического шахтного каталога, у этого процесса в качестве управляющих параметров рассматриваются значения энергии при взрывах и местоположение этих взрывов относительно изучаемой или обрабатываемой области массива. В качестве внутренних параметров выступают кинематические и динамические параметры деформационных волн [7, 8], а также структурные особенности массива, через которые проходят эти волны [9]. Использование методов анализа для краткосрочного и среднесрочного прогноза состояния горного массива только при использовании управляющих параметров не достаточно при наличии резкой его неоднородности. Необходимо в систему мониторинга включить анализ изменения внутренних структурных параметров массива иерархического типа при использовании качественных рекомендаций теории катастроф для управления процессом отработки шахтного массива.

Литература

1. Хачай О.А. Сопоставление особенностей синергетических свойств состояния удароопасного массива горных пород, определяемых по данным сейсмического и индукционного электромагнитного мониторинга / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай // Мониторинг. Наука и технологии. – 2014. – № 3. – С. 50 – 55.
2. Информативные признаки подготовки высокоэнергетических динамических явлений по данным шахтного сейсмологического мониторинга / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Климко, О.В. Шипеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 4. – С. 155 – 216.
3. Одинцев В.Н. Метод аналитического прогноза динамических проявлений горного давления / В.Н. Одинцев // ФТПРПИ. - 1995. - № 4. - С. 12 - 24.
4. Хачай О.А. Определение поверхности аномально напряженного включения в иерархической слоисто-блоковой среде по данным акустического мониторинга / О.А. Хачай, А.Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. - № 4.- С. 354 - 356.
5. Арнольд В.И. Теория катастроф / В.И. Арнольд. - 3-е изд., доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 128 с.
6. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса / Ю.Л. Климонтович. – М.: Ком. Книга, 2007. – 328 с.
7. Хачай О.А. Динамические характеристики медленных волн деформации как отклика массива на взрывные воздействия / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Климко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 208 – 214.
8. Хачай О.А. Исследование иерархической структуры динамических характеристик медленных деформационных волн - отклика на взрывные воздействия / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, О.В. Шипеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 5. – С. 215 – 222.



9. Изучение нелинейного динамического состояния горного массива по данным сейсмического каталога в глубоких шахтах при техногенных воздействиях / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Клишко, О.В. Шипеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 4. – С. 217 - 230.