

**О.А. Хачай<sup>1</sup>, О.Ю. Хачай<sup>2</sup>, В.К. Климко<sup>3</sup>,  
О.В. Шипеев<sup>3</sup>**

*<sup>1</sup>Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,  
г. Екатеринбург, Россия,*

*<sup>2</sup>Уральский Федеральный Университет  
им. Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия,*

*<sup>3</sup>Таштагольский рудник, филиал ОАО Евразруда,  
г. Таштагол, Россия*

## **КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕДЛЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЛН В ПОРОДНОМ МАССИВЕ КАК ОТКЛИК НА ВЗРЫВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Введение параметра – скорости распространения медленных деформационных волн – позволило с помощью метода фазовых диаграмм идентифицировать их иерархическую структуру, что в дальнейшем дает возможность использовать эту информацию для моделирования и интерпретации распространения сейсмических и деформационных волн в иерархических средах. Рассмотрена тонкая структура хаотической области на фазовой диаграмме для понимания зарождения резонансного высокоэнергетического выброса в виде горного удара и выработки критерия оценки устойчивости массива.

**Ключевые слова:** скорость распространения, деформационная волна, сейсмологическая информация, фазовые траектории, кинематический подход, динамическая характеристика.

**Введение.** Исследования состояния массива с использованием подходов теории динамических систем [2, 5, 8] проводились с целью выяснения критериев смены режимов диссипативности для реальных горных массивов, находящихся под сильным техногенным воздействием. При реализации этого исследования были использованы данные сейсмического каталога Таштагольского подземного рудника за два года наблюдений с июня 2006 г. по июнь 2008 г. В качестве данных использованы пространственно-временные координаты всех динамических явлений – откликов массива, происшедших за указанный период внутри шахтного поля, и взрывов, произведенных для отработки массива, а также значения зафиксированной сейсмической станцией энергии взрывов и откликов массива [5]. Все шахтное поле было разделено на две части: выработки северо-западного участка, районы стволов Западная и Новокапитальная, и выработки

0–14, обозначенные нами как северный участок. Выработки 15–31 и южный вентиляционный и полевой штреки, ствол Южной шахты, выработки юго-восточного участка рассмотрены как южный участок. Учитывались все события-отклики с горизонтов –140, –210, –280, –350 м. Взрывы производились на южном и северном участках. Сейсмологический каталог был также разделен на две части: северную и южную, по событиям-откликам и взрывам, происходившим в этих частях шахтного поля.

Фазовые портреты состояния массивов северного и южного участков построены в координатах  $E\nu(t)$  и  $d(E\nu(t))/dt$ ,  $t$  – время, выраженное в долях суток,  $E\nu$  – выделенная массивом сейсмическая энергия, Дж. В работе [5] проанализирована морфология фазовых траекторий сейсмического отклика на взрывные воздействия в различные последовательные промежутки времени на южном участке шахты. По данным о произведенных технологических и массовых взрывах, большая часть энергии была закачана именно в южный участок шахты. Кроме того, в конце 2007 г. на 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 отмечается 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 выброс превышает  $10^5$  Дж, достигая  $10^6$  и даже  $10^9$  Дж [5].

Исследуемый объем массива один и тот же, и мы изучаем процесс его активизации и спада. Очевидно, что имеют место два взаимозависящих друг от друга процесса: накопление энергии, что отражается в области, притягивающей фазовые траектории, и резонансный сброс накопленной энергии. Интересно отметить, что после такого сброса система возвращается в ту же притягивающую фазовые траектории область. Это подтверждается и детальным анализом фазовых траекторий сейсмического отклика массива до и после самого сильного горного удара. Однако на изменение состояния массива сильно влияет достаточно регулярное внешнее воздействие в виде взрывов различной мощности. За время между взрывами массив не успевает выделить полученную им энергию. Это приводит к реакции запаздывания отклика и нелинейности его проявления, что затрудняет прогноз по времени сильно энергетического разрушительного события [6, 9–11]. Исходя из идей, изложен-

ных в работах [1, 3, 4], нами дополнена анализируемая база данных пространственных координат взрывов, их значения введены в предложенный ранее метод обработки данных сейсмологического мониторинга и дополнены новыми параметрами последнего.

**Анализ кинематических характеристик медленных деформационных волн.** Будем рассматривать каждую точку взрыва как источник сейсмических и деформационных волн. Согласно кинематическому подходу обработки сейсмической информации, каждую точку отклика массива будем использовать как пространственно-временную точку первого вступления деформационной волны для вычисления скорости распространения волны. Введем следующие группы градаций скоростей: *первая*, м/ч – от 1000 до 500 (1), от 500 до 100 (2), от 100 до 50 (3), от 50 до 10 (4), от 10 до 1 (5), от 1 до 0,01 (6); *вторая*, м/с – от 1000 до 500, от 500 до 100, от 100 до 50, от 50 до 10, от 10 до 1, от 1 до 0,01. Все отклики массива вместе с их пространственно-временными, скоростными и энергетическими характеристиками распределим соответственно этим градациям. Затем вычислим средние значения скоростей распространения деформационных волн, участвующих в динамических явлениях массива для каждой градации от взрыва к взрыву.

На рис. 1 отчетливо видно, что волны со скоростями из различных градаций воздействуют на массив последовательно, при этом имеет место наложение влияния деформационных волн, которое зависит от строения массива и мощности взрыва. Как правило, наложение влияния происходит для волн со скоростями из соседних градаций, при этом волны действуют совместно на разных расстояниях от источника взрыва и возбуждение массива имеет не точечный, а объемный характер.

**Анализ динамических характеристик медленных деформационных волн.** Параллельно с вычислением средних значений скоростей деформационных волн, участвующих в динамических явлениях массива, для каждой градации от взрыва к взрыву находим суммарное значение выделенной энергии массивом в рамках волнового деформационного процесса для каждой градации скоростей. Этот алгоритм применен ко всему имеющемуся материалу сейсмологического шахтного мониторинга. В качестве примера его использования приводим рис. 2. Несмотря на то что взрывы происходили только на юго-востоке, после третьего взрыва произошел толчок с энергией  $10^5$  Дж для градации  $V_s = 4$ . Кроме того, до значений  $10^3$  Дж энергия выделяется волнами

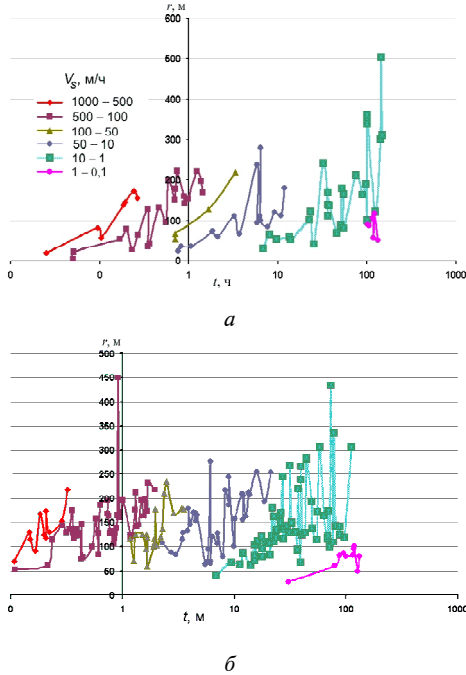


Рис. 1. Зависимость времени прихода деформационной волны от расстояния до источника взрыва: а – 19.11.2006 г., массовый взрыв, блок 18, горизонт (–350)–(–280), обрушение, 167,8 т ВВ,  $E = 1,21 \cdot 10^9$  Дж; б – 24.12.2006 г., массовый взрыв, блок 26, горизонт (–350)–(–280), обрушение, 200,2 т ВВ,  $E = 9,5 \cdot 10^7$  Дж

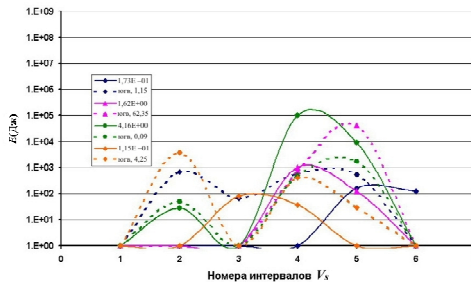


Рис. 2. Распределение выделяемой массивом энергии по грациям средних скоростей распространения деформационных волн от взрыва к взрыву за период 14.01–18.02.2007 г. Штриховые линии – выделенная энергия в южной части шахты, сплошные – в северной части шахты. Числа в легенде при сплошной и штриховой кривых – отношение выделенной массивом энергии к поглощенной в момент взрыва (в %) в соответственных частях шахты; югв – взрыв произведен на юго-востоке шахты

*Динамические явления в массиве, связанные с деформационным волновым процессом*

Временной интервал	Выделенная энергия, Дж									
	более $10^5$					более $10^4$				
1	0	0	с(4)	0	–	–	ю(5)	с(4)	0	–
2	0	0	0	0	–	с(4,5)	ю(5)	0	ю(4)	–
3	0	0	0	(ю+с)(5)	–	с(6)	0	0	(ю+с)(5)	–
4	ю(5)	0	с(5)	0	–	(ю+с)(5)	с(6),ю(4)	с(5)	0	–
5	0	0	0	0	ю(5)	0	0	ю(4)	0	ю(5)
6	0	0	0	0	–	0	0	0	0	–
7	ю(3)	0	0	0	с(5)	ю(3)	с(4)	0	с(4)	с(5)

для всех градаций, кроме 1 и 6, от  $10^3$  до  $10^4$  Дж – для градаций 2, 4, 5, от  $10^4$  до  $10^5$  Дж – для градаций 4 и 5. Эта особенность прослеживается и при обработке данных для следующих временных интервалов. В таблице отражены результаты анализа динамических характеристик медленных деформационных волн за период 14.01–30.12.2007 г. Этот период разделен на 7 интервалов, включающих в себя по 4 или 5 технологических либо массовых взрывов. Буквой “ю” или “с” в таблице обозначено место, где происходило динамическое явление: в южной либо в северной части шахтного поля. Цифры в скобках обозначают номер интервала средней скорости распространения деформационных волн. Из результатов таблицы видно, что за период 14.01–30.12.2007 г. динамических явлений в южной и северной частях шахтного поля с энергией более  $10^5$  Дж было немного – по количеству они распределены практически равномерно. Однако в 7-м временном интервале динамическое явление в южной части шахты обладало энергией чуть меньше, чем  $10^9$  Дж. Что предшествовало этому событию? Весь 6-й временной интервал характеризуется зоной затишья, при этом не зафиксировано ни одного события с энергией больше, чем  $10^4$  и тем более  $10^5$  Дж. Имели место форшоки в 3-м, 4-м и 5-м временных интервалах, после совершения разрушительного события активизировалась северная часть шахты, несмотря на то, что взрывы продолжали производить в южной части шахты. Это отражает синергетическую взаимосвязь состояния массива в целом в шахте [5].

**Выводы.** Нами разработан новый алгоритм обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога с учетом кинематических и динамических характеристик деформационных волн, распространяющихся с разными скоростями в массиве горных пород, который

испытывает интенсивное внешнее воздействие в виде массовых или технологических взрывов.

1. Установлено, что волны, распространяющиеся со скоростями от 10 до 1 м/ч, преимущественно переносят энергию в массиве и способствуют ее выделению. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения менее  $10^4$  Дж, влияют на криповую перестройку массива.
2. События, происходящие в массиве с указанными скоростями и обладающие энергией выделения более  $10^5$  Дж, могут быть использованы как предвестники. Рекомендуются принимать их во внимание при корректировке производства взрывов в той или иной части массива.
3. Полное отсутствие рассмотренных событий свидетельствует об увеличении напряженного состояния в массиве шахты в целом.
4. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога важна для моделирования и интерпретации распространения сейсмических и деформационных волн в иерархических структурах [7].

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-00013 и Интеграционного проекта УрО РАН с СО РАН 2012–2014 гг.*

1. Курленя М.В. О формировании упругих волновых пакетов при импульсном возбуждении блочных сред. Волны маятникового типа  $U_m$  / М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.И. Востриков // Докл. АН СССР. – 1993. – Т. 333, № 4. – С. 473–475.
2. Наймарк Ю.И. Стохастические и хаотические колебания / Ю.И. Наймарк, П.С. Ланда. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 424 С.
3. Опарин В.Н. Квазистатика и динамика массива горных пород в областях сильного техногенного воздействия / В.Н. Опарин, А.В. Леонтьев // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Тр. конф. с участием иностр. ученых, Новосибирск, 6–10 июля 2009 г. – Новосибирск: Ин-т геодинамики СО РАН, 2010. – С.15–29.
4. Опарин В.Н. Об одном кинематическом критерии прогнозирования предельного состояния массивов горных пород по шахтным сейсмологическим данным / В.Н. Опарин, В.Н. Востриков, А.П. Тапсиев и др. // ФТПРПИ. – 2006. – № 6. – С. 3–10.
5. 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. Клишко, О.В. Шипеев // Горн. информ.-аналит. бюл. МГГУ. – 2010. – № 6. – С. 259–271.
6. Хачай О.А. Геосинергетика: теория, методика, эксперимент // Комплексный анализ электромагнитных и других геофизических данных. Гл. 8 / Под ред. В.В. Спичака. – М.: КРАСАНД, 2011. – 192 с.
7. Хачай О.А. Изучение напряженно-деформированного состояния иерархических сред / О.А. Хачай, А.Ю. Хачай // Третья тектонофиз. конф. в ИФЗ РАН. Материалы докл., Москва, 8–12 окт. 2012 г. – М.: ИФЗ РАН, 2012. – С.114–117.

8. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики. – М.: Физматлит, 2003. – 294 с.
9. Hachay O.A. The reflection of synergetic Features in the Response of geological Medium on outer Force Actions / O.A. Hachay, O.Yu. Khachay, V.K. Klimko, O.Yu. Shipeev // Advances in heterogeneous Material Mechanics. – Shanghai, China, 2011. – P. 361–366.
10. Hachay O.A. Construction of a State Evolution dynamical Model of a Rock Massive, which is in a regime of energetic Pumping / O.A. Hachay, A.Yu. Khachay, O.Yu. Khachay // Geophys. Res. abstracts. – 2011. – Vol. 13. – EGU2011 – 1528.
11. Khachay O.A. Dynamical model for evolution of Rock Massive State as a Response on a Changing of Stress-Deformed State / O.A. Hachay, A.Yu. Khachay, O.Yu. Khachay // Fractal analysis and Chaos in Geosciences. Ch. 5 / ed. by Sid-Ali Quadfeul. – In Tech, Croatia, 2012. – 174 p.

**Кінематичні і динамічні характеристики повільних деформаційних хвиль у породному масиві як відгук на вибухові впливи** О.О. Хачай, О.Ю. Хачай, В.К. Климко, О.В. Шипеев

Введення параметру – швидкості розподілення повільних деформаційних хвиль – дозволило разом із застосуванням методу фазових діаграм ідентифікувати їх ієрархічну структуру, що дозволяє в подальшому використовувати цю інформацію для моделювання та інтерпретації поширення сейсмічних та деформаційних хвиль в ієрархічних середовищах. Розглянуто тонку структуру хаотичної області на фазовій діаграмі для розуміння зародження резонансного високоенергетичного викиду у вигляді гірського удару і виробки критерію оцінки стійкості масиву.

**Ключові слова:** швидкість поширення, деформаційна хвиля, сейсмологічна інформація, фазові траєкторії, кінематичний підхід, динамічна характеристика.

**Kinematic and dynamical characteristics of slow deformation waves propagation in the rock massif as a response to explosion influences** O.A. Khachay, O.Yu. Khachay, V.K. Klimko, O.V. Shipeev

An additional parameter – “velocity of slow deformation wave propagation” allowed us, using the method of phase diagrams, to identify their hierarchic structure, which make it possible to use that information for modeling and interpretation of propagation of seismic and deformation waves in hierarchic structures. Analyzed here is the thin structure of the chaotic area on the phase diagram, which provides better understanding of the origin of high energetic rock shock and permits to create an evaluation criterion for massif stability evaluation.

**Keywords:** velocity of propagation, deformation wave, seismological information, phase trajectories, kinematic approach, dynamical characteristic.