

УДК 622.83.550.3

В.В. Бодин**О ПРИРОДЕ СВЯЗИ НЕЛИНЕЙНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С НАПРЯЖЕННЫМ СОСТОЯНИЕМ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ**

Рассмотрены основные свойства нелинейных колебаний, регистрируемых в локально-напряженной зоне, сформированной в окрестности тектонического нарушения. Предлагается физическая модель генерации нелинейных колебаний, основанная на теории физической мезомеханики.

Ключевые слова: тектоническое нарушение, сместитель, породный массив, микроповорот зерна.

Многолетняя история наблюдений горных ударов указывает на их пространственную приуроченность к геологическим неоднородностям к таким как тектонические нарушения, дайки и контакты разномодульных пород. При этом, подавляющее большинство горных ударов происходит вблизи тектонических нарушений, по данным различных источников, с ними связано от 60 до 90 процентов динамических проявлений горного давления [1, 2].

Изучению характера распределения напряжений в пределах тектонических нарушений, в виду важности вопроса, посвящено достаточно большое количество как натурных, так и лабораторных исследований [3, 4, 5, 6], из которых следует, что в крыльях разломных структур существуют локальные зоны концентрации напряжений, в которых величина напряжения может на порядок превышать напряжения, измеренных за пределами этих зон. В зависимости от морфологии тектонических наруше-

ний выделяют несколько типов пространственного распределения напряжений в прилегающем породном массиве. Наиболее распространённый тип имеет асимметричное распределение двух локальных зон повышенных напряжений [3]. Одна из зон примыкает к плоскости сместителя со стороны лежащего крыла нарушения, вторая зона расположена в височем крыле и удалена от сместителя на расстояние равное зоне динамического влияния разлома (рис. 1), в пределах которой горные породы испытывают пластическое деформирование [6].

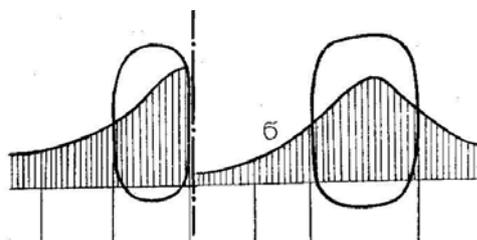


Рис. 1. Распределение напряжений в окрестности тектонического нарушения, по данным работы [3]

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-00013-А.

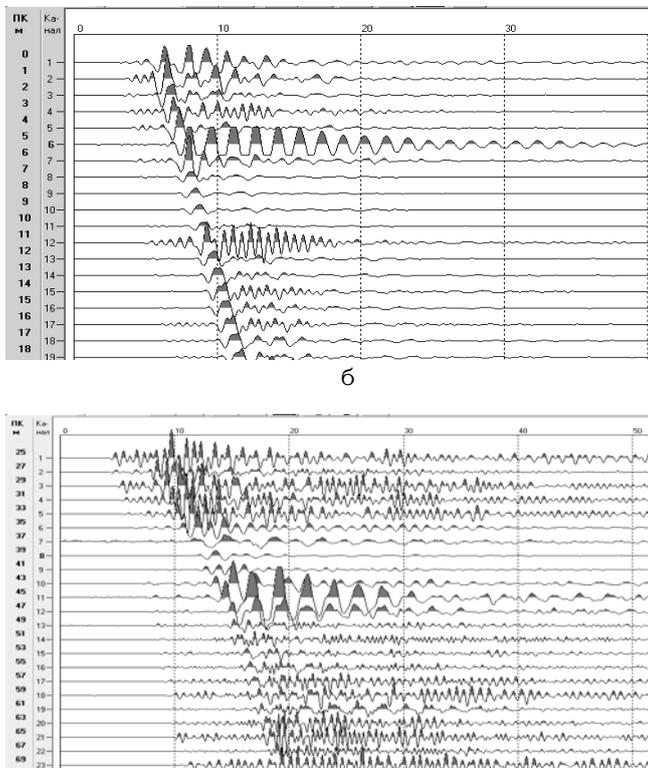


Рис. 2. Сейсмограммы с записью нелинейных колебаний, а — г. Н—Тагил, шахта «Естюнинская», б — г. Красноурьинск, шахта «Северопесчанская»

В связи с быстро меняющейся геодинамической обстановкой шахтного поля актуальным является контроль напряжённого состояния активных тектонических нарушений. Одним из способов решения данной проблемы является использование динамических параметров нелинейных колебаний, зарегистрированных в массиве горных пород, прилегающих к тектоническим структурам.

Сейсмическими исследованиями, выполненными в окрестности тектонических нарушений, пересекающих горную выработку, установлено наличие нелинейных колебаний, возбуждаемых проходящей сейсмической волной [7].

Данные нелинейные колебания обладают рядом характерных признаков, к которым относятся аномальная длительность колебательного процесса, аномальная амплитуда и частотный спектр, содержащий как высокочастотные колебания $F_B \geq f_p$, где f_p частота колебаний продольной (P) волны и низкочастотные колебания $F_H \leq f_s$, где f_s частота колебаний поперечной (S) волны.

Высокочастотные колебания, как правило, регистрируются в более монолитном, чем вмещающие горные породы, висячем крыле и пространственно совпадают с максимумом концентрации напряжения. Низкочастотные приурочены, согласно работе [6], к зоне пластической деформации и минимального уровня напряжений. Частотный спектр нелинейных колебаний представлен либо одной гармоникой, в случае незначительных действующих напряжений, либо двумя, тремя и более, в случае относительно высоких напряжений.

На рис. 2 приведены сейсмограммы с зарегистрированными в окрестности тектонических нарушений нелинейными колебаниями.

Сопоставление осреднённого значения частоты аномальных колебаний F_{cp} и среднего значения действующих напряжений σ_{cp} , определённых на одних и тех же интервалах горных выработок, расположенных вне зоны влияния техногенных напряжений, показало наличие прямой корреляционной связи между этими параметра-

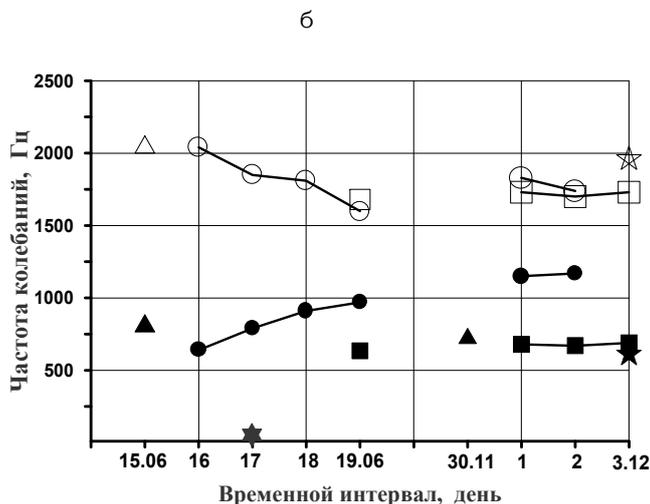
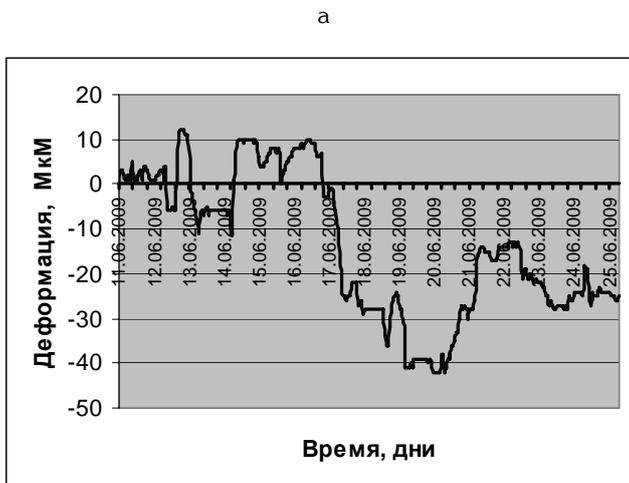


Рис. 3. Графики изменения величины деформации (а) и частоты аномальных колебаний (б) в период прохождения волны деформации на ш. «Естюнинская»

ми, которая описывается выражением вида [8]:

$$\sigma_{\text{ср}} = 5.884 \exp(0.002 F_{\text{ср}}) \text{ мПа},$$

где $F_{\text{ср}}$ — среднее значение частоты нелинейных колебаний в Гц.

Установленная закономерность даёт основание рассматривать динамические параметры аномальных колебаний в качестве индикатора напряжённого состояния породного массива в окрестности отдельного тектони-

ческого нарушения. Зависимость спектра акустических колебаний от величины давления подтверждается работами по физическому моделированию, в которых регистрировались колебания, распространяющиеся в нагружаемом образце горной породы [9] или серии блоков, находящихся под действием возрастающей нагрузки [10].

Сейсмический мониторинг, выполненный на шахте «Естюнинская» (г. Н-Тагил), показал, что при изменении напряжённого состояния породного массива, частота нелинейных колебаний, регистрируемых в крыльях тектонических структур, изменяется разнонаправлено. Так увеличение напряжения, вызванное волной деформации [2], которая была зарегистрирована деформационной станцией (рис. 3, а), привело к росту частоты колебаний в лежащем крыле и падению частоты в висячем крыле (рис. 3, б). После окончания воздействия волны деформации, частота колебаний нелинейных волн вернулась к фоновому уровню.

Анализ данного исследования показывает, что напряжённое состояние породного массива в зоне локальной концентрации является функцией совместного действия поля естественных и техногенных напряжений, релаксация техногенных напряжений в окрестности тектонических структур происходит достаточно быстро — в течении 3-х — 4-х дней. Структурные

элементы тектонических нарушений деформируются по различным законам, если лежащее крыло деформируется упруго, на допредельной стадии деформирования, о чём говорит возрастающая частота нелинейных колебаний, то висячее крыло деформируется, либо пластически, либо в предельной стадии деформирования с падением частоты колебаний.

Следовательно, динамические параметры нелинейных колебаний, регистрируемых в окрестности тектонических нарушений, отражают уровень действующих напряжений в текущий момент времени и по соотношению частот F_v / F_n , по аналогии с отношением модуля спада (M) к модулю упругости (E) M/E [11], позволяют дать оценку характера деформирования и степени удароопасности тектонической структуры.

Для надёжной оценки геодинамической активности породного массива, основанной на анализе динамических параметров нелинейных колебаний, необходимо иметь представление о физической природе данного явления и его математическое описание.

Генерация колебаний с отличающимися частотными характеристиками от инициирующих их сейсмических волн была установлена достаточно давно, но попытки представить обоснованную физическую и математическую модель получили начало с развитием теории нелинейной сейсмологии. Основной моделью для описания генерирования, как высокочастотных с удвоением частоты колебаний, так и низкочастотных с удвоением периода при прохождении сейсмических волн, являлась трибологическая модель — модель генератора сухого трения. Генерация высокочастотных нелинейных колебаний рассматривается в рамках теории нелинейной упругости в соот-

ветствии с микрополярной теорией [12], согласно которой, высокочастотные колебания вызваны вращательным микроколебанием зерен. Частота колебаний определяется внутренним масштабом и не зависит от частоты сейсмической волны.

Генерация низкочастотных колебаний рассматривается также в рамках нелинейной модели упругой среды при условии микроповоротов зерен [13]. В качестве математической модели осциллятора принято нелинейное уравнение Дуффинга с действием внешней гармонической силы.

Несмотря на то, что модель генератора сухого трения описывает возникновение дополнительных гармоник при распространении сейсмического волнового поля в нелинейной геосреде, в ней не находят отражения такие эффекты как зависимость частоты колебаний от напряжённого состояния и одновременного генерирования высокочастотных и низкочастотных нелинейных колебаний, установленные в натуральных экспериментах [7]. К недостатку рассмотренной модели можно отнести и то, что в ней предполагается однородное распределение энергии по объёму среды, в то время как в окрестности контактов разномодульных горных пород присутствуют локальные зоны концентрации упругой энергии, которые представляет собой нелинейные диссипативные структуры.

Диссипация накопленной энергии в диссипативной структуре может происходить различными путями [14], одним из них является колебательный процесс, в течение которого происходит сброс накопленной энергии. По выражению С.В. Гольдина (2004) геосреда использует любое возмущение на то чтобы сбросить излишнее накопленное напряжение.

Согласно новым представлениям, деформация является многомасштабным процессом, который развивается, начиная с микроуровня и заканчивая макроуровнем деформируемой среды [15]. Экспериментально и по результатам математического моделирования было установлено, что в процессе деформирования реальных сред, независимо от их природы, на сопряжении разномодульных материалов возникает квазипериодическое распределение зон сжимающих и растягивающих напряжений, которые представляют собой динамические структуры способные к накоплению и сбросу упругой энергии. Характер распределения зон концентрации напряжений зависит от упругих свойств материала и изменяется по мере усиления внешнего воздействия [16], структуры макролокализации обратимы после снятия напряжения. Зависимость внутренней структуры распределения локальных напряжений от величины действующего напряжения была также установлена в теоретической работе [17], в которой показано, что с ростом напряжения, расстояние между полосами локализации касательных напряжений уменьшается.

Исследования, выполненные в работе [18], показали, что процесс макролокализации характерен для любых условий нагружения, а параметры очагов определяются стадийностью кривой нагружения. При пластическом деформировании, также как и при упругом, возникают локальные зоны концентрации напряжений.

Таким образом, экспериментальные и теоретические исследования показали, что в процессе деформирования материала, не зависимо от масштаба наблюдений, в нём возникают квази-

периодические зоны локальной концентрации напряжений, которые можно рассматривать, как полевые структуры. Геометрические параметры данных структур, а, следовательно, и собственная частота колебаний которых, определяются величиной действующих напряжений и характером деформирования материала.

Результаты исследований [15, 16, 17, 18], поскольку в них показано, что локализация очагов напряжений характерна для любых материалов, допустимо использовать для обоснования модельных представлений о природе связи динамических параметров нелинейных колебаний с напряжённым состоянием локальных зон концентрации напряжений в окрестности тектонических нарушений.

В объёме локальных зон тектонических нарушений, вследствие высокой концентрации напряжений, возникают квазипериодические очаги динамических полевых структур, которые под влиянием ударно-волнового воздействия сейсмической волны осциллируют, осуществляя диссипацию накопленной упругой энергии. Частота нелинейных колебаний определяется геометрическими параметрами динамических очагов, которые зависят от уровня действующих напряжений. С увеличением напряжения, уменьшается расстояние между очагами, что приводит к росту частоты собственных колебаний полевой динамической структуры.

В заключение, необходимо отметить, что деформирование реальной геологической среды является нелинейным термодинамическим процессом, который находит отражение в геофизических полях, изучение которых позволит ближе подойти к пониманию природы геодинамических явлений.

1. Редькин В.А., Калугин В.В., Кузнецов Ю.С., Рябов Л.Г. Основные проблемы горных ударов и их предотвращение на рудниках Талнаха. // Прогноз и предотвращение горных ударов при разработке рудных месторождений. Илим. Фрунзе. 1986. С. 48—56.
2. Еременко А.А., Курленя М.В. Разработка железорудных месторождений в зонах повышенной сейсмической активности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 2. С. 3—11.
3. Методические рекомендации и наказы по повышению безопасности ведения горных работ в удароопасных условиях у тектонических нарушений на шахтах СУБРа / Сост. А.А. Аксенов, Р.П. Потехин, В.С. Помакин, А.Н. Шабаров. Североуральск, 1994. 82 с.
4. Шабаров А.Н. О формировании геодинамических зон, опасных по горно-тектоническим ударам // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. № 2. С. 16—27.
5. Ватолин Е.С., Черняков А.Б., Рубан А.Д., Потапов А.М. Методы и средства контроля состояния и свойств горных пород в массиве. М.: Недра, 1989. С. 173.
6. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. Новосибирск: «Наука», Сибирское отделение, 1990. 295 с.
7. Бодин В.В. Исследование нелинейных эффектов сейсмического волнового поля, вызванных тектоническим нарушением. Горный информационно-аналитический бюллетень. М. МГУ, № 4, 2006. С. 93—96.
8. Бодин В.В. К проблеме геодинамического районирования шахтных полей // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических толей. Пятое научные чтения памяти Ю.П. Булашевича. Материалы. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН.— 2009.— С. 43—45.
9. Петухов И.М., Смирнов В.А., Шкодырев В.И. Прогноз и предотвращение динамических явлений на основе энергетической модели разрушения горных пород. // Сборник трудов. ВНИМИ. Физика и механика разрушения горных пород применительно к горной механике. — 1993. С. 42—51.
10. Опарин В.Н., Юшин В.Ф., Акишин А.А. О конвергенции частот акустических сигналов при нагружении моделей блочных сред на стадии предразрушения // Геодинамика и напряжённое состояние недр Земли. Труды международной конференции. Из-во СО РАН.— 1999.— С. 77—85.
11. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра. 1985. 271 с.
12. Крылов А.Л., Мазур Н.Г., Николаевский В.Н., Эль Г.А. Градиентно-согласованная модель генерации ультразвука при распространении сейсмических волн // Прикладная математика и механика, 1993. — Т. 57.— № 6. С. 100—109.
13. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. Нелинейная математическая модель генерирования низких частот в спектре сейсмического сигнала // ДАН СССР —1997.— Т. 352. — № 5.
14. Митлин И.С., Николаевский В.Н. Нелинейная диффузия тектонических напряжений // ДАН СССР. — 1990. — Т. 315.— № 5. С. 1093—1096.
15. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Данилов В.И. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения. Новосибирск. — Наука. Сиб. отдел.— 1990. 235 с.
16. Панин В.Е., Моисеенко Д.Д., Максимова П.В., Панин А.В. Физическая мезомеханика деформируемого твёрдого тела как многоуровневой системы. III. Неупругий предвестник пластического сдвига. // Физическая мезомеханика. — Т. 9. — № 5. — С. 5—15.
17. Никитин Л.В., Рыжик Е.И. Закономерности разрушения горной породы с внутренним трением и дилатансией. // Физика Земли. 1977, № 5. С. 22—37.
18. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. Новосибирск. Наука. 2008. 327 с. **ИДAS**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Бодин Валерий Викторович — старший научный сотрудник Института горного дела, bodinv1@K96.ru