

УДК 622.83+ 530.1(075.8)

## РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ГЕОДИНАМИКИ С ПОЗИЦИИ ГЕОСИНЕРГЕТИКИ

*О.А. Хачай*

Рассмотрено решение геодинамической проблемы с использованием геосинергетического подхода. 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, находящемся под интенсивным внешним воздействием в виде массовых или технологических взрывов.

*Ключевые слова:* геодинамика; геосинергетика; отклик массива; медленные волны деформации; сейсмический шахтный каталог; алгоритм обработки сейсмологической информации; сценарий подготовки горных ударов.

---

## SOLUTION OF GEODYNAMICAL PROBLEMS FROM THE POINT OF VIEW OF SYNERGETIC

*O.A. Hachay*

It is considered the relation of solution geodynamic problems by geosynergetical approach. It had been developed a new algorithm of seismological information processing of detailed mines catalogue with use kinematic and dynamical characteristics of deformation waves, which propagate with different velocities in the rock massif, which is under heavy influence of single blasts and technological explosions.

*Key words:* geodynamics; geosynergetics; massif response; slow deformation waves; seismic mine catalogue; analyze of observed data, algorithm of seismological information processing; scenario of the preparation of rock bumps.

Геодинамика как самостоятельная дисциплина в области наук о Земле оформилась в 70-е годы прошлого столетия. Ее развитию в основном способствовало появление и быстрое распространение новой тектонической концепции – теории тектоники литосферных плит, которая вытеснила господствовавшее в середине века представление о ведущей роли в смещениях и деформациях земной коры вертикальных движений. Она вывела на первое место горизонтальные перемещения литосферных плит, включавших не только кору, но и верхи мантии. Объяснялись такие перемещения тепловой конвекцией в астеносфере. Дальнейшая разработка теории тектоники плит стала предметом новой синтетической науки – геодинамики, изучающей физические процессы, которые обуславливают развитие твердой Земли в целом, и силы, их вызывающие. Геодинамика привлекает данные не только всех разделов геофизики (от гравиметрии до сейсмологии), но и всех геологических (геотектоники, петрологии, литологии), а также геохимических (изотопной геохимии в особенности) дисциплин [1].

Примерно в это же время возникает новое междисциплинарное направление в физике открытых динамических систем, называемое синергетикой. Этот термин впервые ввел Г. Хакен в 1980 г. [2]. Его работы были посвящены теории самоорганизации в различных природных системах. В настоящее время получены важные теоретические и экспериментальные результаты, подтверждающие актуальность синергетического подхода для изучения универсальных свойств открытых неравновесных динамических систем, кооперативных эффектов в процессах самоорганизации [3]. И. Пригожин и его школа помогли установить связь между возникновением структур, феноменологическими моделями и представлениями неравновесной термодинамики, что сыграло большую роль в теоретическом и экспериментальном изучении упорядоченности в открытых системах [4–6].

Известно, что геологическая среда является открытой динамической системой, испытывающей на разных масштабных уровнях естественные и искусственные воздействия, изменяющие ее состояние, приводящие в результате к сложной многогранной

иерархической эволюции, что и является одним из предметов изучения геосинергетики [7–11]. Подавляющее число геологических систем являются открытыми и неравновесными, которые могут длительно функционировать только в режиме прокачки через них энергии. Прекращение энергетического потока обрекает систему на переход в стадию консервации, когда длительность существования обуславливается ее энергетическим потенциалом за счет накопленной энергии на предыдущем этапе. Отличительной чертой открытых геологических систем является их необратимость и многофункциональность. Используя синергетический подход, следует четко различать масштабы природных явлений. Так, рост отдельных кристаллов подчиняется законам термодинамики, а уже морфология скопленных кристаллов, изменения их форм определяется состоянием среды роста, характером внешних воздействий [12].

Геологические среды можно разделить на сосредоточенные и рассредоточенные. Сосредоточенные системы характеризуются непрерывностью и представляют единое целое на рассматриваемом интервале времени и параметрах состояния, определяющих в первом приближении их стационарность. Это может быть магматическая камера, единая флюидная система, блок горных пород близкого состава, водный бассейн, нефтяная залежь, массивное рудное тело. В сосредоточенных стационарных системах протекают неравновесные процессы, направленные на выравнивание термодинамических параметров, характеризующих их состояние. Рассредоточенные системы представляют совокупность автономных подсистем, сообщающихся между собой каналами тепло- и массопереноса в рамках необратимых процессов, которые можно разбить на несколько стационарных состояний, характеризующихся на выбранном интервале времени постоянством управляющих параметров процесса. Для гетерогенных и сложных по составу реальных геологических систем целесообразно говорить о равенстве не всех параметров, а только тех, которые определяют макроскопическое состояние данной конкретной системы – ее управляющих параметров. В преобладающем числе случаев геологические системы относятся к нестационарным, поскольку за время своего существования их параметры не остаются неизменными. Весь путь развития таких систем разбивается на ряд стационарных подсистем, характеризующихся малыми изменениями их параметров на выбранном временном интервале. Соответственно для каждой такой стационарной подсистемы будет характерен набор стационарных процессов, зафиксированных в определенных структурно-веществен-

ных комплексах. На определенной стадии развития открытая динамическая система, обменивающаяся веществом и энергией с окружающей средой, распадается на ряд подсистем, которые в свою очередь могут и далее дробиться на еще меньшие системы. Как проводить между ними границы, если процессы в этих системах могли протекать десятки и сотни миллионов, а иногда и миллиарды лет тому назад. Критерием определения границ таких систем является одно из положений синергетики: макроскопические процессы в системах, где в нелинейной области протекают процессы самоорганизации, совершаются кооперативно, согласованно и когерентно. В случае с геологическими системами граница будет проходить по линии смены одних структурно-вещественных комплексов другими, обычно это минеральные агрегаты.

В основе процессов самоорганизации в открытых неравновесных геологических системах лежит энергетическое начало. Если энергетический потенциал не достигает порогового значения, то процессов самоорганизации не происходит, если же его достаточно, чтобы компенсировать его потери во внешнюю среду, то в ней будут проявляться процессы самоорганизации и образовываться пространственно-временные или временные структуры. Переход хаос-структура осуществляется скачком. Если поступление энергии в систему слишком много, структурирование среды прекращается, и мы имеем переход к хаосу. Парадигма физической мезомеханики, введенной академиком В.Е. Паниным и его школой [13], включающая в себя синергетический подход, является конструктивным средством для изучения и изменения состояния гетерогенных материалов. Этот результат получен на образцах различных материалов. В наших исследованиях нестационарной геологической среды в рамках натуральных экспериментов в реальных горных массивах, находящихся под сильным техногенным влиянием, было показано, что динамика состояния может быть выявлена с использованием синергетики в иерархических средах [14, 15]. Важную роль для исследования динамических геологических систем играет сочетание активного и пассивного геофизического мониторинга, который можно осуществить с использованием электромагнитных и сейсмических полей. Изменение состояния системы на исследуемых пространственных базах и временах проявляется в параметрах, связанных со структурными особенностями среды второго и более высокого ранга. Таким образом, изучение динамики состояния, его структуры и явления самоорганизации локальных участков среды следует вести геофизическими методами, настроенными на многогранную иерархическую нестационарную модель среды. В работе [16]

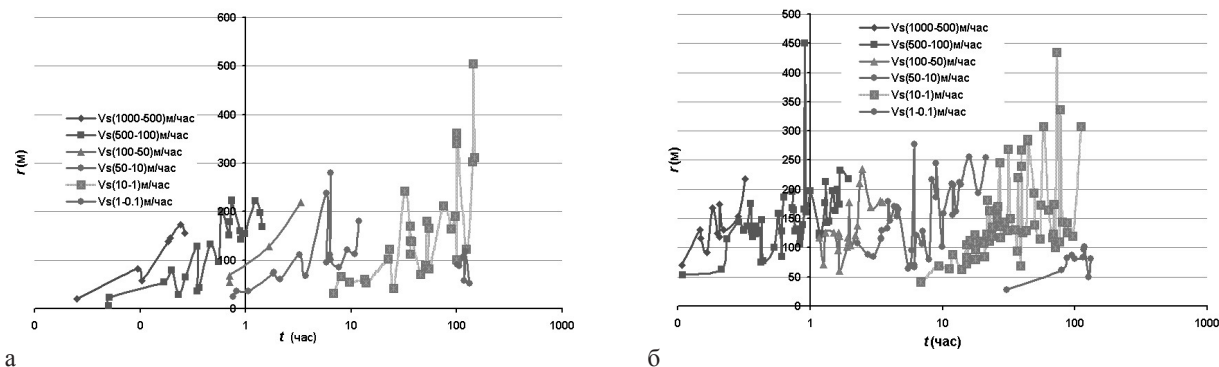


Рисунок 1 – Зависимость времени прихода деформационной волны от расстояния до источника взрыва:  
 а – 19.11.2006 г. Массовый взрыв, блок 18, горизонт (-350) – (-280), обрушение, 167.8 т ВВ,  $E = 1.21 \cdot 10^9$  Дж,  
 б – 24.12.2006 г. Массовый взрыв, блок 26, горизонт (-350) – (-280), обрушение, 200.2 т ВВ,  $E = 9.5 \cdot 10^7$  Дж

обобщены результаты по методике изучения синергетических проявлений геологической среды, находящейся под активным внешним воздействием; с помощью метода фазовых портретов исследован вопрос об отражении синергетических свойств геологической среды в данных активного электромагнитного и сейсмического мониторинга. Результаты анализа детального сейсмологического каталога с точки зрения математических основ синергетики и открытых динамических систем, обладающих свойствами нелинейности и диссипативности [17], приводят нас к необходимости постановки новой задачи математического моделирования, отличной от имевшей место ранее постановки. Если в предыдущих постановках 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. С другой – этот параметр 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, так как в пространстве изученных нами распределений фазовых траекторий существует притягивающая точка, в плоскости выделенная энергия и производная по времени от логарифма выделенной энергии. Таким образом, дальнейшее изучение детального сейсмического каталога позволяет сформулировать критерии прогноза поведения горного массива с точки зрения математической теории синергетики [18]. Исходя из идей, изложенных в работах [19, 21], мы решили дополнить анализируемую базу данными пространственных координат взрывов, ввести их в предложенный ранее метод обработки данных

сейсмологического мониторинга и дополнить его новыми параметрами. Будем рассматривать каждую точку взрыва как источник сейсмических и деформационных волн. Используя кинематический подход обработки сейсмической информации, будем каждую точку отклика массива использовать как пространственно-временную точку первого вступления деформационной волны для вычисления скорости волны. Введем следующие две группы градаций скоростей от 1–6 в каждой группе. Первая группа – от 1000 до 500 м/час (1), от 500 до 100 м/час (2), от 100 до 50 м/час (3), от 50 до 10 м/час (4), от 10 до 1 м/час (5), от 1 до 0.01 м/час (6). Вторая группа – от 1000 до 500 м/сек, от 500 до 100 м/сек, от 100 до 50 м/сек, от 50 до 10 м/сек, от 10 до 1 м/сек, от 1 до 0.01 м/сек. Все отклики массива вместе с их пространственно-временными, скоростными и энергетическими характеристиками распределим соответственно этим градациям. Затем вычислим средние значения скоростей деформационных волн, участвующих в динамических явлениях массива для каждой градации от взрыва к взрыву.

На рисунках 1а, 1б 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 эти волны совместно действуют на разных расстояниях от источника взрыва и возбуждение массива имеет не точечный, а объемный характер.

Параллельно с вычислением средних значений скоростей деформационных волн, участвующих в динамических явлениях массива для каждой градации от взрыва к взрыву, вычислим суммарное значение выделенной энергии массивом в рамках

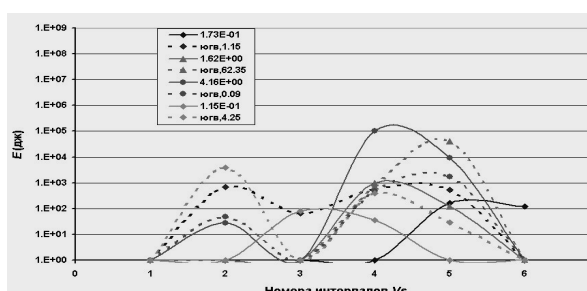


Рисунок 2 – Распределение выделяемой массивом энергии по градациям средних скоростей деформационных волн от взрыва к взрыву за период (1) 14.01.–18.02.2007. Пунктирные линии – выделенная энергия в южной части шахты, сплошные линии – в северной части шахты, числа в легенде при сплошной и пунктирной кривых соответствует отношению выделенной массивом энергии к поглощенной в момент взрыва в процентах в соответствующих частях шахты, югв – означает, что взрыв произведен на юго-востоке шахты

волнового деформационного процесса для каждой градации скоростей. Этот алгоритм был применен ко всему имеющемуся материалу сейсмологического шахтного мониторинга. В качестве примера его использования приводим рисунок 2.

Несмотря на то, что взрывы происходили только на юго-востоке (см. рисунок 2) после третьего взрыва произошел толчок энергией  $10^5$  Дж для градации  $V_s = 4$ . Кроме того, до значений энергии  $10^3$  Дж энергия выделяется волнами для всех градаций, кроме 1 и 6, от  $10^3$  до  $10^4$  Дж – для градации 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. С помощью разработанного алгоритма обработки сейсмологической информации детального шахтного каталога удалось проследить сценарий подготовки горных ударов с энергиями больше, чем  $10^5$  Дж. Установлено, что волны, распространяющиеся со скоростями от 10 до 1 м/час, являются преимущественным переносчиком энергии в массиве и способствующими ее выделению. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения меньше, чем  $10^4$  Дж, способствуют криповой перестройке массива. События, происходящие в массиве с этими скоростями и обладающие энергией выделения больше, чем  $10^5$  Дж, могут быть использованы как предвестники, которые рекомендуется принимать во внимание при корректировке производства взрывов в той или иной части массива. Полное отсутствие этих событий свидетельствует об увеличении напряженного состояния в массиве шахты в целом. Полученная комплексная информация из данных сейсмологического каталога является важной для моделирования и интерпрета-

ции распространения сейсмических и деформационных волн в иерархических структурах [21]. Этот же подход может быть использован для анализа сейсмологических данных на сейсмологических полигонах для геодинамического мониторинга.

Работа выполнена в рамках ПП с СО РАН 2012–2014.

#### Литература

1. Хаин В.Е. Современная геодинамика: достижения и проблемы / В.Е. Хаин // Природа. 2002. № 1. С. 51–60.
2. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. М.: Мир, 1980. 404 с.
3. Ахромеева Т.С. Структуры и хаос в нелинейных средах / Т.С. Ахромеева, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий и др. М.: Физматлит, 2007. 488 с.
4. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. М.: Мир, 1973. 280 с.
5. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах / Г. Николис, И. Пригожин. М.: Мир, 1979. 512 с.
6. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / И. Пригожин. М.: Наука, 1985. 160 с.
7. Булашевич Ю.П. Конвективная устойчивость земных недр с внутренними источниками тепла / Ю.П. Булашевич, Ю.В. Хачай // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1975. № 12. С. 13–18.
8. Тихонов А.Н. Об эволюции зон проплавления в термической истории Земли / А.Н. Тихонов, Е.А. Любимова, В.К. Власов // ДАН СССР. 1969. Т. 188. С. 338–342.
9. Трубицын В.П. Тектоника плавающих континентов / В.П. Трубицын // Вестник РАН. 2005. № 1. С. 10–22.
10. Хачай Ю.В. Термическая эволюция дифференцируемой верхней мантии / Ю.В. Хачай // Геология и геофизика. 1979. № 1. С. 83–92.
11. Хачай Ю.В. Уширение конвективной ячейки и возможность локализации конвекции в верхней мантии / Ю.В. Хачай // Физика Земли. 1982. № 12. С. 19–28.
12. Летников Ф.А. Некоторые проблемы синергетики в науках о Земле / Ф.А. Летников // Синергетика геосистем. М.: МО РМО, 2007. С. 7–15.
13. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.Е. Панин. Новосибирск: Наука СИФР, 1995. Т. 1. 365 с.
14. Хачай О.А. Метод оценки и классификации устойчивости массива горных пород с позиции теории открытых динамических систем по данным геофизического мониторинга / О.А. Хачай, О.Ю. Хачай // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 6. С. 131–142.
15. Хачай О.А. Геофизический мониторинг состояния массива горных пород с использованием парадиг-

- мы физической мезомеханики / О.А. Хачай // Физика Земли. 2007. № 4. С. 58–64.
16. Хачай О.А. Геосинергетика: теория, методика, эксперимент / О.А. Хачай // Комплексный анализ электромагнитных и других геофизических данных. М.: КРАСАНД, 2011. С. 181–191.
17. Климонтович Ю.Л. Введение в физику открытых систем / Ю.Л. Климонтович. М.: “Янус-К”, 2002. 284 с.
18. Чуличков А.И. Математические модели нелинейной динамики / А.И. Чуличков. М.: Физматлит. 2003. 294 с.
19. 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 // ДАН СССР. 1993. Т. 333. № 4. С. 473–475.
20. Опарин В.Н. Об одном кинематическом критерии прогнозирования предельного состояния массивов горных пород по шахтным сейсмологическим данным / В.Н. Опарин, В.И. Востриков, А.П. Тапсиев и др. // ФТПРПИ. 2006. № 6. С. 3–10.
21. Хачай О.А. Изучение напряженно-деформированного состояния иерархических сред / О.А. Хачай, А.Ю. Хачай // Третья тектонофизическая конф. в ИФЗ РАН: матер. докл. конф. Москва, 8–12 октября 2012 г. М.: ИФЗ РАН, 2012. С. 114–117.